



SÄHKÖISTEN AURINKOPANEELI- EN TESTAUSYMPÄRISTÖ

Juha Pellonpää

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

JUHA PELLONPÄÄ:
Sähköisten aurinkopaneelien testausympäristö

Opinnäytetyö 58 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Huhtikuu 2013

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, miten voidaan mallintaa auringon säteilyä sisätiloissa ja hyödyntää sitä aurinkopaneelien tutkimiseen. Työn tutkimustuloksien perusteella esitellään laitteisto, jolla voidaan mallintaa auringon säteilyä sisätiloissa. Tavoitteena oli suunnitella järjestelmä, jolla voidaan mallintaa eri sääolosuhteita ja auringon liikkeitä taivaalla. Laitteistosta haluttiin helposti siirrettävä.

Työssä tutkittiin aurinkopaneeleja, auringon valon spektriä sekä auringon säteilyn voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Säteilyn voimakkuuteen vaikuttavat mm. pilvisuus, kellonaika ja vuodenaika. Mitä matalammalta aurinko paistaa, sitä pidemmän matkan valo kulkee ilmakehän läpi, mikä taas vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen. Pilvet ja ilmakehä vaikuttavat myös hieman säteilyn spektriin.

Tuloksien perusteella valittiin valaisimet ja muut komponentit, joilla voidaan toteuttaa paneelien testausympäristö. Rikkiplasmavalaisin tuottaa näkyvää valoa lähes samanlaisella spektrillä kuin aurinko. Halogeenivalaisimilla tuotetaan infrapunasäteily ja vahvistetaan hieman rikkiplasmavalaisimen näkyvän valon spektriä.

Työssä todettiin, ettei auringon kiertorataa taivaalla pystytä mallintamaan laitteistolla todenmukaisesti. Valaisimet täytyy sijoittaa niin lähelle paneelia, ettei valo tule paneelin pinnalle yhtä tasaisesti kuin auringon valo. Mallinnetut arvot eivät vastaisi todellisia arvoja. Parempia tuloksia saataisiin, mikäli valaistuksen tehoa nostettaisiin ja valaistus siirrettäisiin kauemmaksi paneelistä. Tämä ei kuitenkaan ollut mahdollista laitteiston siirrettävyyksivaatimuksen ja tilan puutteen takia.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electric Power Technology

JUHA PELLONPÄÄ:
Photovoltaic panel testing environment

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 2 pages
April 2013

In this research it was studied how to simulate solar radiation in laboratory, and how to test solar panels indoors. The results of this research are used to select the right components to the solar panel test environment. The test system should be able to simulate different kinds of weather conditions as well as the movements of the sun in the sky. The equipment had to be easily transportable.

The thesis was to examine photovoltaic panels, the spectrum of the sunlight and the sun's radiation intensity factors. The intensity of radiation is affected by cloud cover, the time of the day and the season of the year. The closer the sun is at the horizon, the lower the intensity of the radiation. Clouds also affect the radiation spectrum slightly.

Lamps and other equipment were chosen by the results of the studies. Sulphur plasma lamp produces visible light with an almost identical spectrum as the sun. The halogen lamp is used to produce infrared radiation.

It was pointed out that it is not possible to simulate the sun's orbit truthfully with this equipment. Lamps must be placed so close to the panel that the light is not as even as the sunlight. Therefore, modeled values do not correspond to the true values. In order to simulate sun's orbit in the sky, the light source should be far away. This was not possible because of lack of space and the requirement for portability.

Key words: solar panel, photovoltaic panel, solar radiation, spectrum, sulphur plasma light, halogen light

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	AURINKOPANEELI.....	8
2.1	Rakenne	9
2.2	Sähköiset ominaisuudet	10
2.3	Toimintaan vaikuttavat tekijät	11
2.3.1	Valon spektri	12
2.3.2	Säteilyn voimakkuus	15
2.3.3	Saapuvan valon kulma	16
3	ULKO-OLOSUHTEIDEN MALLINTAMINEN	17
3.1	Aurinko	17
3.1.1	Pilvetön sää	19
3.1.2	Pilvinen sää	20
3.2	Korkeuskulma	22
3.2.1	Suomi	23
3.2.2	Päiväntasaaja	27
3.3	Laitteistovaatimukset	29
4	LAITTEISTO	30
4.1	Standardit	30
4.1.1	Ksenonvalaisin	31
4.1.2	Rikkiplasmavalaisin	32
4.1.3	Halogeenivalaisin	34
4.1.4	Muut valaisimet.....	36
4.2	Paneelin etäisyys valaisimesta	37
4.2.1	Etäisyys kahdella valaisimella	39
4.2.2	Etäisyys kolmella valaisimella.....	41
4.2.3	Eri heijastuskulma.....	42
4.3	Valaisimien teho	43
4.4	Pimennysverho.....	43
4.5	Alusta	44
4.5.1	Kulman säädön ja valaistuksen välinen ongelma.....	46
4.6	Mittalaitteisto	47
4.6.1	Spektrometri	47
4.6.2	Pyranometri	48
4.7	Yhteenveto	49
5	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	53

LIITTEET	57
Liite 1. Tarvikkeet	57
Liite 2. Paneelin ja auringon väliset kulmat Tampereella	58

LYHENTEET JA TERMIT

A	ampeeri, sähkövirran yksikkö
AM	Air Mass, ilmakehän vaikutusta kuvaava luku
ASTM	American Society for Testing and Materials –standardi
IEC	International Electrotechnical Commission –standardi
JIS	Japanese Industrial Standard
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
V	voltti, jännitteen yksikkö
W	watti, tehon yksikkö

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella Tampereen ammattikorkeakoululle suunnitella olevaan GreenLab -ympäristöön laitteisto, jolla voidaan simuloida aurinkopaneelin käyttäytymistä auringon valossa eri puolilla maapalloa sekä erilaisissa tilanteissa.

Aurinkopaneelien käyttö pientuotannossa lisääntyy tulevaisuudessa ja tämän vuoksi myös koulun on kehitettävä oppiympäristöään vastaamaan tulevaisuuden tarpeita. Tarkoituksena on, että koulu rakentaa opinnäytetyössä tutkittujen tietojen perusteella laitteiston, jota oppilaat voivat käyttää opinnoissaan.

Työssä tutkitaan aurinkopaneelin toimintaa, auringon valoa ja eri sääolosuhteiden vaikutusta auringon säteilyyn. Tutkittua tietoa sovelletaan laitteiston komponenttien valintaan. Työssä esitellään komponentit, joilla voidaan toteuttaa aurinkopaneelien testausympäristö. Testausalustassa on taso, jonka päälle aurinkopaneeli asetetaan. Tasoa voidaan kallistaa erilaisiin kulmiin, jolloin voidaan tutkia miten eri kulmassa saapuva valo vaikuttaa paneelin toimintaan.

Suunnittelun lähtökohtana on liikuteltava laitteisto, jolloin esimerkiksi koulun esittelytilaisuuksissa paneelien testausalusta voidaan siirtää näyttille käytävälle. Laitteistoon täytyisi sopia yleisesti myynnissä olevat aurinkopaneelipaketit.

2 AURINKOPANEELI

Aurinkopaneelin toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön. Aurinkopaneelilla voidaan muuttaa auringon säteily sähköksi. Paneelien tuottama sähkö on tasasähköä. Nykyisten paneelien hyötysuhde on noin 10-15 %, eli ne voivat hyödyntää säteilystä vain pienen osan (Hellengren, Heikkinen, Suomalainen & Kala 1999, 27).

Aurinkopaneelien käyttö alkaa yleistyä mikrotuotannossa. Mikrotuotanto on sähköntuotantoa siellä, missä sitä tarvitaan. Sähkö voidaan siis tuottaa omaan taloon osittain aurinkopaneeleilla, jolloin sähköverkosta ei välttämättä tarvitse ottaa sähköä ollenkaan. Ylimääräinen sähkö voidaan myydä paikalliselle sähköyhtiölle (Vattenfall).

Aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joten se ei sovellu sellaisenaan käytettäväksi rinnan verkon kanssa. Sähkö täytyy muuttaa inverttereillä vaihtosähköksi ja mikäli niitä aikoo käyttää rinnan sähköverkon kanssa, täytyy EU:n direktiivin (EN50438) mukaiset vaatimukset täyttyä invertterillä (Finnwind 2013).

Aurinkopaneeleja voidaan käyttää myös mökkikohteissa omavaraisena tuotantona. Tällöin yleensä käytetään 12 V sähköjärjestelmää, jolloin paneelit lataavat akkuja. Ilman akkuja tasaista sähköntuotantoa ei saataisi, sillä aurinkopaneelien tuotto riippuu eri tekijöistä. Paneeli, akku ja kuorma liitetään tässä järjestelmässä lataussäätimeen.

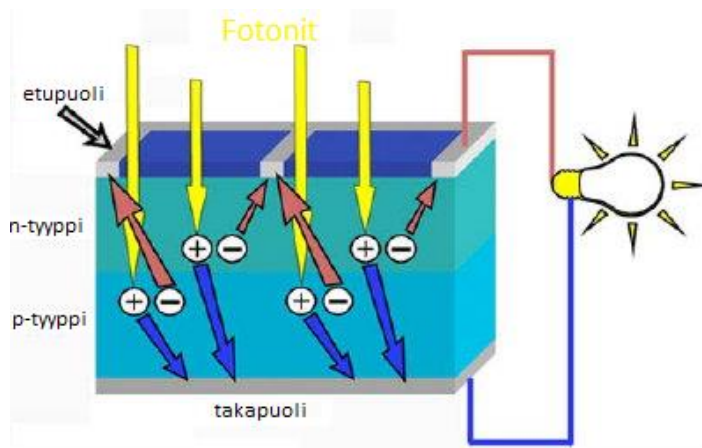
Paneelin etupinnan suojana käytetään lasia, joka heijastaa mahdollisimman vähän auringon valoa pois paneelistä. Lasi on pinnaltaan yleensä hieman epätasainen ja sen takapuoli on takaisin heijastava, joten valo ei karkaa kennon sisältä pois. Lasi suojaa myös kennoja erilaisilta sääilmiöiltä. Kuvassa 1 on esimerkki aurinkopaneelistä (Markvart & Castañer 2006, 16).



KUVA 1. Aurinkopaneeli (MidSouth Building Supply)

2.1 Rakenne

Kuviossa 1 on esitetty aurinkokennon rakenne. Auringon säteily sisältää fotoneita, jotka törmätessään aurinkokennoon synnyttävät elektroni-aukko parin. Elektronit siirtyvät negatiiviselle puolelle ja aukot positiiviselle puolelle. Positiivisen ja negatiivisen navan välille syntyy tällöin jännite. Kun positiivinen ja negatiivinen napa yhdistetään, syntyy niiden välille virtaa (Markvart & Castañer 2006, 6).



KUVIO 1. Aurinkokennon toiminta (Specmat 2009)

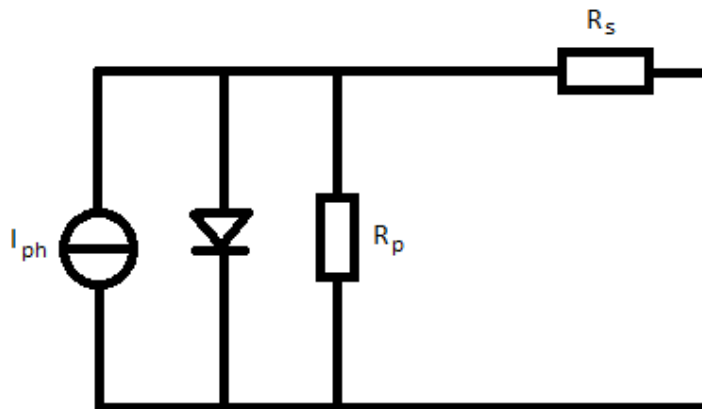
Aurinkokennoissa käytetään eri materiaaleja ja yleisimmät materiaalit ovat moni- ja yksikiteinen pii. Moni- ja yksikiteisten aurinkopaneelien osuus aurinkopaneeleista oli vuonna 2009 81 %. Aurinkopaneeli koostuu sarjaan tai rinnan kytketyistä kuvan 2 mukaisista aurinkokennoista. Sarjaan kytkemällä kennoja saadaan nostettua paneelin jännite halutuksi (Sidhu, R. & Carlson, D. 2010).



KUVA 2. Yksi aurinkokenno (Solarpowernotes)

2.2 Sähköiset ominaisuudet

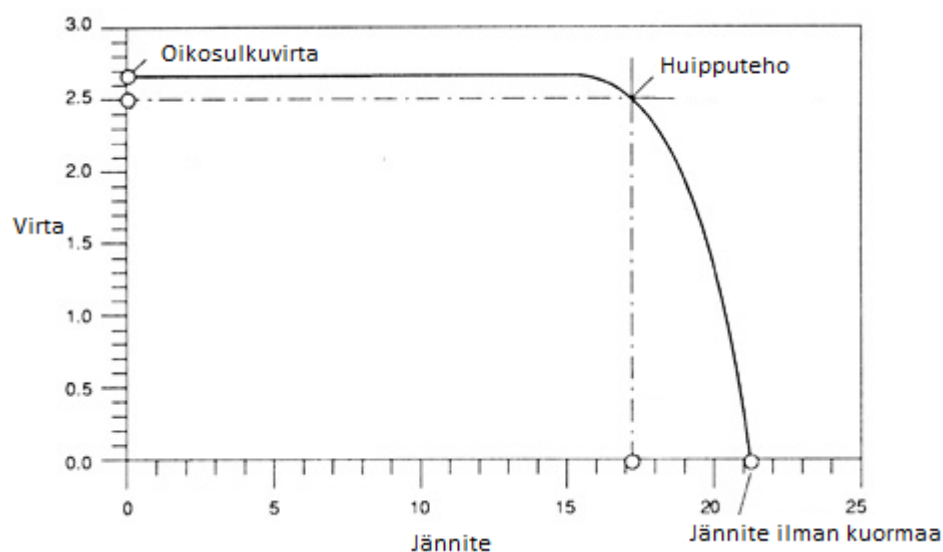
Aurinkokennoa voidaan mallintaa kuvion 2 mukaisella sijaiskytkennällä.



KUVIO 2. Aurinkokennon sijaiskytkentä

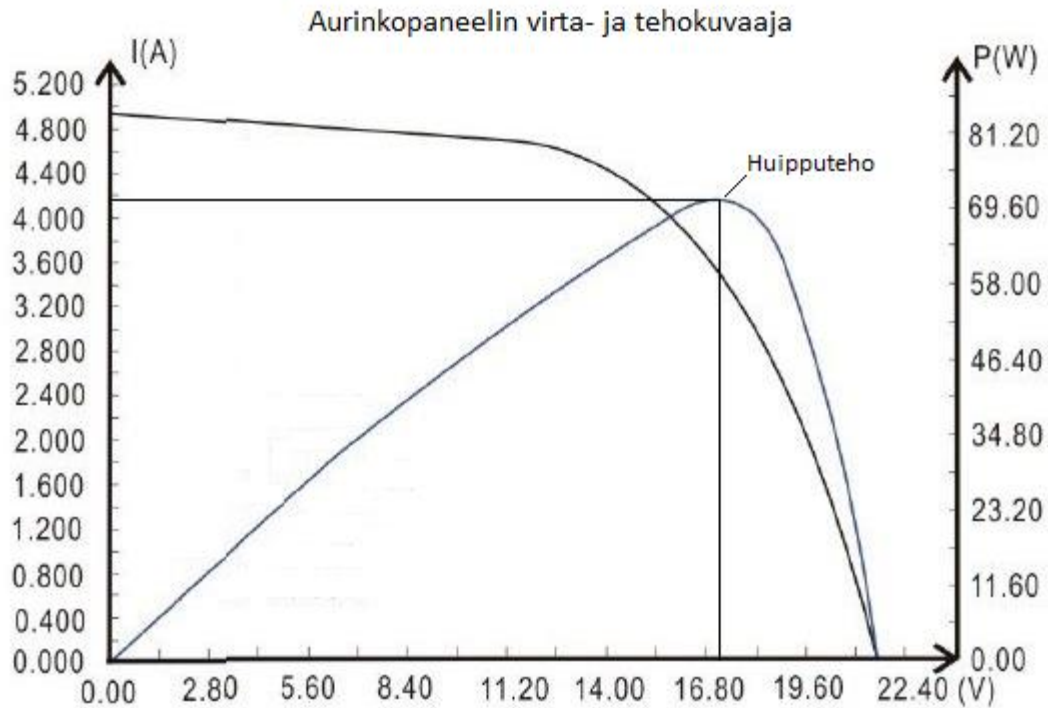
Kuviossa 2 I_{ph} on virtalähde, jonka virta riippuu valosta. Ideaalisessa aurinkokennossa on vain virtalähde ja sen rinnalla diodi. Koska aurinkokennot eivät todellisuudessa ole ideaalisia, on kytkentään lisätty komponentit R_p ja R_s . Tällöin sijaiskytkentä ei ole enää ideaalinen ja vastaa todellista aurinkokennoa (Markvart & Castañer 2006, 9).

Ideaalisen aurinkokennon virta käyttäytyy jännitteen funktiona kuvion 3 mukaisesti. Kuormituksen kasvaessa virta pysyy vakiona, mutta jännite muuttuu. Jännite ei voi kuitenkaan nousta yli kennon tyhjäkäyntijännitteen. Kuorman resistanssin kasvaessa tarpeeksi suureksi, alkaa virta pienentyä jännitteen noustessa.



KUVIO 3. Aurinkopaneelin virta jännitteen funktiona (Letting Chibobo Shine)

Kuviossa 4 on esimerkki erään aurinkopaneelin virta- ja tehokuvaajasta. Kuvaajassa vasemmalla puolella on virta I ampeereina ja oikealla puolella teho P watteina.



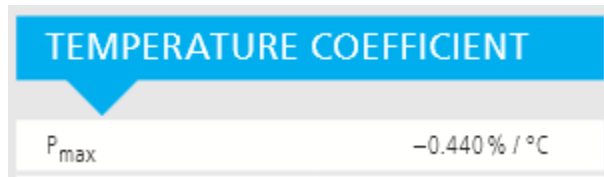
KUVIO 4. Aurinkokennon virta- ja tehokuvaaja (Weicu)

Kuvasta nähdään, että virta pysyy likimain samana n. 14 volttiin saakka. Huipputeho saadaan kuormalla, jolloin jännite on noin 17-18 V. Toisin kuten ideaalisen aurinkopaneelin kuvaajassa, virta ei pysy täysin vakiona vaan laskee hieman kuormituksen kasvaessa. Teho nousee lähes lineaarisesti kunnes saavutetaan huipputeho. Mikäli tämän jälkeen kuorman vastusta lisätään, alkaa teho nopeasti pudota.

2.3 Toimintaan vaikuttavat tekijät

Aurinkokennon ulostuloon vaikuttaa eri tekijöitä. Valon määrä on suurin vaikuttava tekijä. Suurin tuotto saadaan pilvettömällä säällä suorassa auringon paisteessa. Yöllä, kun valoa ei ole, paneelin sähköntuotanto on olematonta. Lisäksi sähkön tuotantoon vaikuttaa valon spektri sekä valon tulokulma. Myös kennon lämpötilalla on vaikutusta paneelin sähköntuotantoon. Aurinkopaneelien valmistajat ilmoittavat kuinka paljon läm-

pötila vaikuttaa paneelin ulostuloon. Esimerkkinä kuvion 5 mukainen Sharpin aurinko-paneelin teknisen tiedon merkintä (Alchemie Limited Inc 2010).



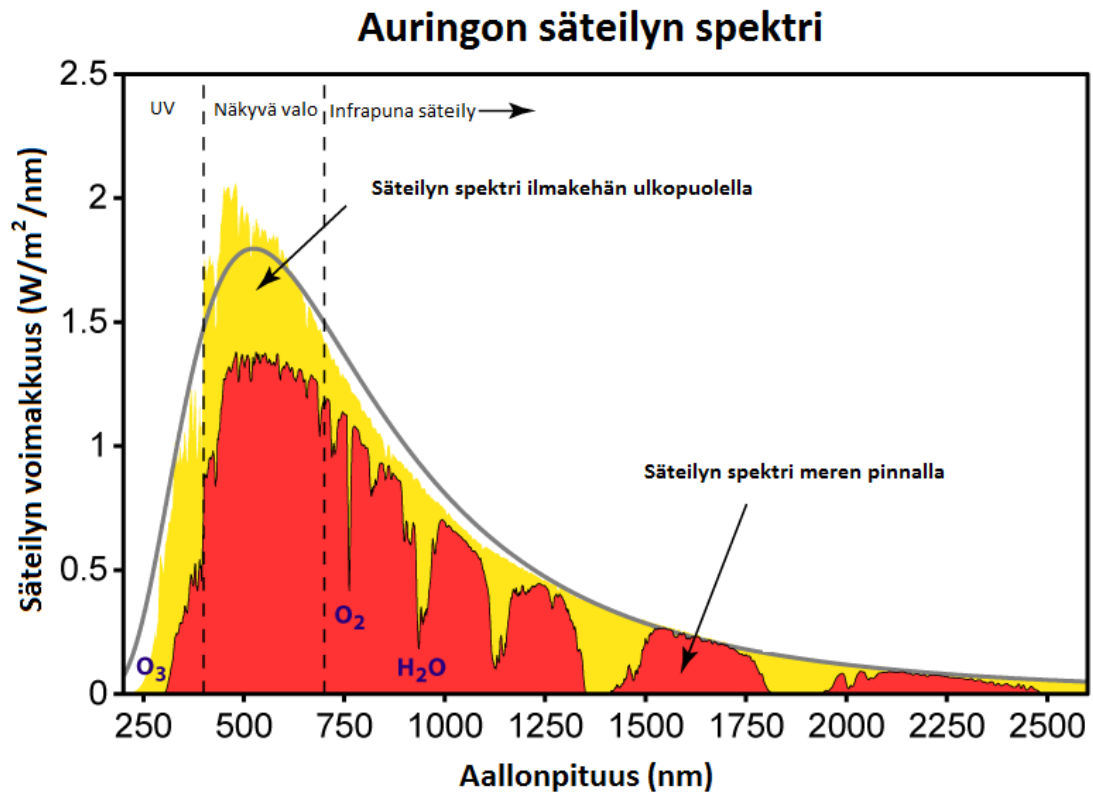
KUVIO 5. Lämpötilan vaikutus paneelin ulostuloon (Sharp)

Valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot pätevät, kun paneeli on 25 °C lämpötilassa. Merkintä P_{\max} -0,440 % / °C tarkoittaa, että paneelin huipputeho putoaa jokaista yli 25 °C ylittävää astetta kohti 0,44 %. Tällöin 48 °C lämpöinen paneeli tuottaa n. 10 % vähemmän valmistajan ilmoittamasta huipputehosta, koska $0,44 \% \cdot 23 \text{ °C} = 10,1 \%$.

Kevätauringossa paneelin hyötysuhde on siis parempi kuin kesällä, koska ympäristön lämpötila voi olla pakkasen puolella. Tällöin paneelistä on mahdollista saada valmistajan ilmoittamaa huipputehoa suurempi teho (Alchemie Limited Inc 2010).

2.3.1 Valon spektri

Valo on sähkömagneettista säteilyä. Auringon säteilyn spektri on kuvion 6 mukainen. Auringon valo sisältää eniten vihreän värin aallonpituutta, jonka pituus on 480 nm. Auringon säteilystä n. 6,4 % energiasta on ultraviolettisäteilyä, joka ei ole silmälle näkyvää valoa. Säteilyn energiasta 48 % on näkyvää valoa. 45,8 % energiasta on infrapunasäteilyä (Tiwari, G. 2002,3).

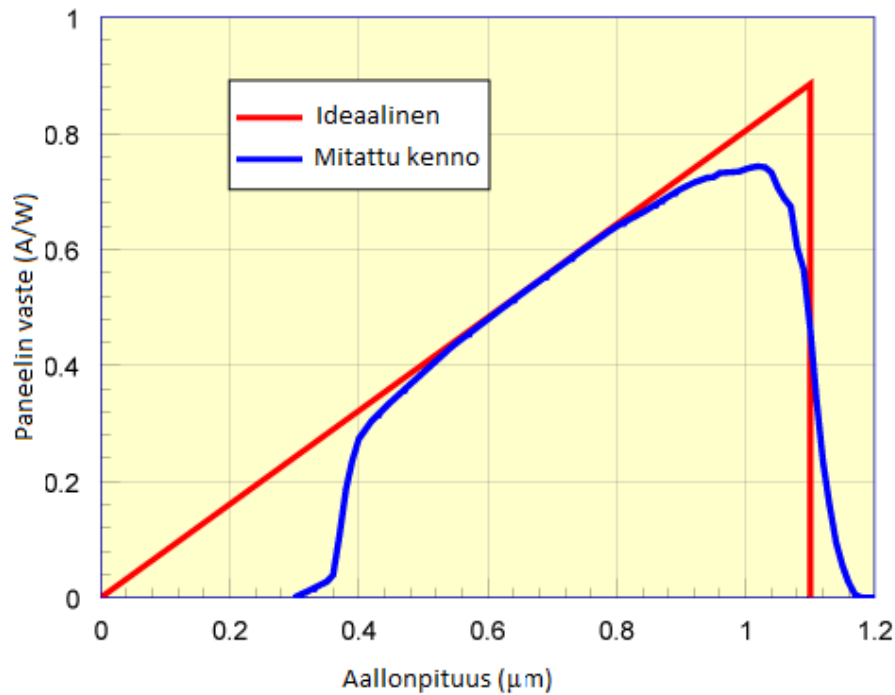


KUVIO 6. Auringon säteilyn spektri (Stellar spectra)

Kuvassa vaaka-akselilla on aallonpituus ilmoitettu nanometreinä. Säteilyn voimakkuus on pysty-akselilla. Pysty-akseli kertoo, kuinka suurella teholla tietty aallonpituus säteilee neliömetrin kokoiselle alueelle.

Näkyvä valo on aallonpituuksiltaan välillä 380-700nm. 380 nm aallonpituus on väriltään violetti ja n. 700 nm aallonpituus on punainen. 380 nm lyhyemmät aallonpituudet ovat ultraviolettisäteilyä ja 700 nm pidemmät aallonpituudet ovat infrapunasäteilyä (Näkö).

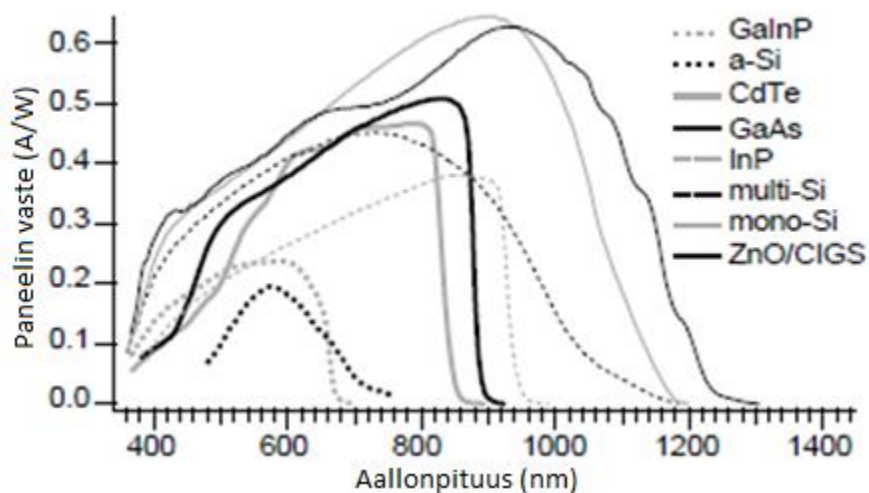
Aurinkopaneelilla on vaste, joka tarkoittaa virran ja tehon suhdetta tietyllä aallonpituudella. Kuviossa 7 on ideaalisen kennon ja piistä valmistetun aurinkokennon vaste.



KUVIO 7. Ideaalisen ja Pii-aurinkokennon vaste (PVEducation, Spectral response)

Pystyakselilla on vaste, joka ilmoitetaan virran ja tehon suhteella. Vaaka-akselilla on aallonpituus mikrometreinä. Lyhyet aallonpituudet eivät läpäise aurinkopaneelin lasia ja siksi vaste on pieni alle 400 nm aallonpituuksilla (PVEducation, Spectral response).

Eri materiaaleista valmistetuilla paneeleilla on erilainen vaste. Kuviossa 8 on esitetty eri materiaaleista valmistettujen aurinkopaneelien vasteet. Kuvasta huomataan, että kaikkien paneelien vaste alkaa näkyvän valon ja ultraviolettisäteilyn rajoilta ja osa toimii myös infrapunasäteilyllä.



KUVIO 8. Erityyppisien paneelien vaste (Field 1997)

Kuviosta 8 voidaan todeta, että paneelit eivät hyödynnä koko auringon spektriä sähköntuotantoon. Parhaimmillaan paneeli tuottaa sähköä noin 380-1300nm aallonpituuksilla.

2.3.2 Säteilyn voimakkuus

Päiväntasaajalla kohtisuorassa auringon valossa meren pinnan tasolla auringon valon teho on 1000 W/m^2 . Aurinkopaneelien hyötysuhde on yleensä noin 10-15 % luokkaa. Tällöin neliömetrin kokoinen aurinkopaneeli voi tuottaa 100-150 W tehon kyseisessä olosuhteessa (Hellengren, Heikkinen, Suomalainen & Kala 1999, 27).

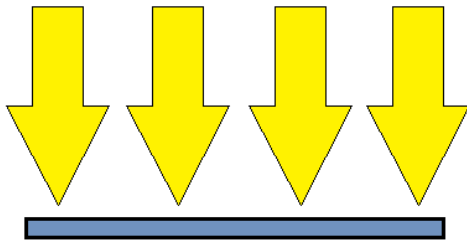
Olosuhteista riippuen auringon valon teho ei kuitenkaan ole optimaalisesti 1000 W/m^2 , vaan vaihtelee esimerkiksi pilvisyydestä riippuen. Pilvet vaikuttavat säteilyn voimakkuuteen. Mitä paksumpi on pilvipeite, sitä enemmän säteily vaimenee. Hajasäteily on n. 10 % suorasta auringon säteilystä. Pilvisellä säällä paneelin sähköntuotanto on pienempi verrattuna pilvettömään säähän (PVEducation, Air Mass; Song, Miller & Garmire 2010).

Myös sijainnilla on vaikutusta auringon säteilyyn. Esimerkiksi Helsingissä säteilyn teho ei ole niin suuri kuin päiväntasaajalla. Tämä johtuu siitä, että auringon valo kulkee pidemmän matkan ilmakehän halki kuin päiväntasaajalla (Opetushallitus).

Varjostus tiputtaa paneelin tehoa. Perinteisesti sarjaan tai rinnan kytkettyjen paneelien ulostulo tipahtaa, mikäli osa paneeleista on varjossa ja osa suorassa auringon paisteessa. Sama pätee, mikäli yhden paneelin yksi kenno peitetään. Paneeliin osuva säteily olisi siis oltava tasainen, jotta saadaan paras mahdollinen tuotto paneelistä. Useamman paneelin järjestelmissä voidaan käyttää mikroinverttereitä, joilla jokaisen paneelin tassa sähkö muutetaan erikseen paneelin lähellä vaihtosähköksi. Tällöin yhden paneelin varjostus ei häiritse muiden paneelien toimintaa (Kodin vihreä energia Oy).

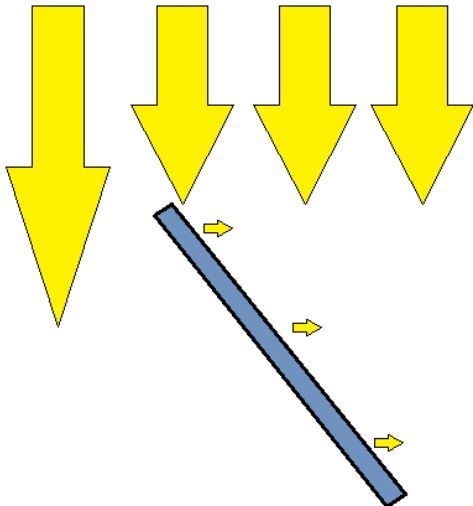
2.3.3 Saapuvan valon kulma

Valon tulokulma vaikuttaa paneelin ulostuloon. Kun valo osuu paneeliin kohtisuoraan, osuu paneelin pinta-alan kokoinen valonippu paneeliin. Kun paneelia kallistetaan, osa kohtisuoran tapauksen valonipusta menee paneelin ohi. Tällöin auringolle näkyvä pinta-ala paneelista on pienentynyt. Lisäksi kulman kasvaessa osa valosta heijastuu paneelin pinnalta. Kuviossa 9 on esitetty tilanne, kun valo tulee paneeliin kohtisuoraan.



KUVIO 9. Kohtisuora valo

Kun samankokoiseen kallistettuun paneeliin tulee sama valonippu, osa valosta menee paneelin ohi. Lisäksi kallistuneen paneelin pinnalta valo heijastuu helpommin pois. Kuviossa 10 on havainnollistettu tilanne.



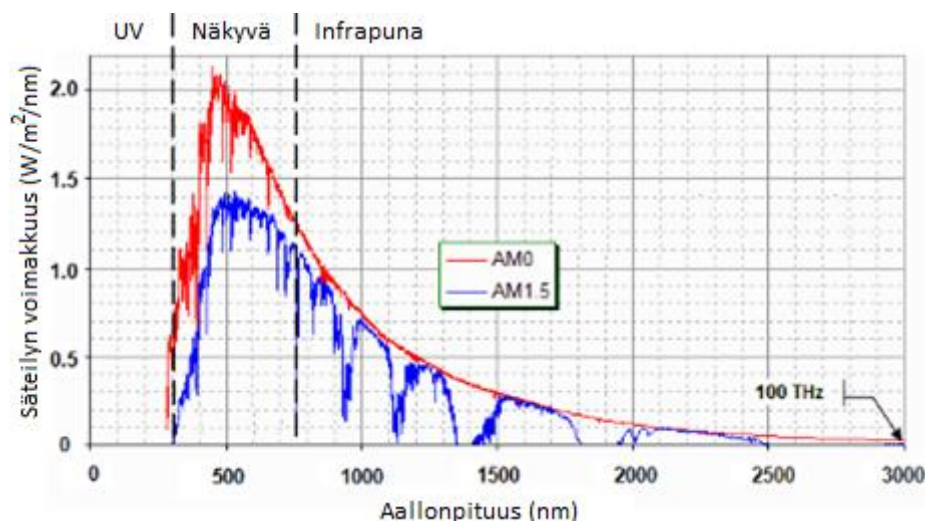
KUVIO 10. Paneeli vinossa valoa vasten

3 ULKO-OLOSUHTEIDEN MALLINTAMINEN

Jotta luonnollisen auringon valoa voidaan mallintaa sisätiloissa, täytyy ymmärtää miten auringon valo käyttäytyy ulkona ja miten eri olosuhteet vaikuttavat siihen. Seuraavaksi tutkitaan miten ilmakehä ja eri olosuhteet vaikuttavat auringon valoon.

3.1 Aurinko

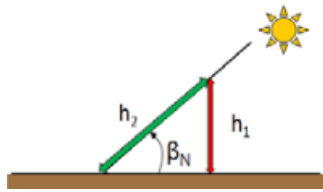
Auringon säteilyn spektristä on olemassa erilaisia versioita. Auringon säteilyn spektri ei ole samanlainen ilmakehän ulkopuolella ja maan pinnalla. Ilmakehän vaikutuksesta on olemassa AM-luku, joka kertoo kuinka paljon pidemmän matkan valo kulkee verrattuna lyhimpään mahdolliseen kulkureittiin. Lyhenne on peräisin sanoista ”Air Mass”. AM0 on säteilyn spektri ilmakehän yläosassa. AM1 on säteilyn spektri meren pinnalla päiväntasaajalla, kun auringon säteet tulevat kohtisuoraan maata kohti. Tällöin valo kulkee lyhimmän mahdollisen matkan ilmakehän läpi. AM1,5 kertoo keskimääräisen säteilyn spektrin maapallolla. Kuviossa 11 on AM0 ja AM1,5 spektrit (Green Rhino Energy Ltd 2012).



KUVIO 11. Auringon säteilyn spektrit (Song, Miller & Garmire 2010)

Kuvassa vaaka-akselilla on aallonpituus nanometreinä ja pysty-akselilla säteilyn voimakkuus. Kuvasta voidaan todeta, että ilmakehän ulkopuolella säteilyn voimakkuus on suurempi näkyvän valon osalta. AM1,5 spektri on kuoppaisempi, koska ilmakehä vaihtelee tiettyjä aallonpituuksia.

AM-luku voidaan laskea kuvion 12 avulla seuraavasti



KUVIO 12. AM-luvun laskenta (Song, Miller & Garmire 2010)

$$m = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{\sin \beta_N} \quad (1)$$

β_N = auringon korkeuskulma

AM-luvun avulla voidaan laskea suurinpiirteinen säteilyn voimakkuus merenpinnalla seuraavasti kaavalla 2 (PVEducation, Air Mass).

$$I_D = 1353 * 0,7^{AM^{0,678}} \quad (2)$$

I_D = säteilyn voimakkuus [W/m^2]

AM = AM-luku

Edellinen kaava antaa suoran auringon säteilyn voimakkuuden. Siinä ei ole mukana hajasäteilyä, joka on noin 10 % suorasta säteilystä. Tällöin kokonaissäteilyn voimakkuus lasketaan kaavalla 3 (PVEducation, Air Mass).

$$I_G = 1,1 * I_D \quad (3)$$

Taulukossa 1 on taulukoituna edellisillä kaavoilla lasketut arvot

TAULUKKO 1. Korkeuskulma ja AM-luku

Auringon korkeuskulma	AM	Suora säteily(W/m ²)	Kokonaissäteily (W/m ²)
90	1,0	947	1042
70	1,1	933	1026
60	1,2	913	1004
50	1,3	883	971
40	1,6	836	920
30	2,0	765	841
20	2,9	647	711
10	5,8	420	462
5	11,5	210	230

Ilmakehän yläosassa auringon AM0 säteilyn teho neliometriä kohti on n. 1353 W/m². AM1 säteily on n. 1040 W/m², mutta yleensä käytetään pyöristettyä 1000 W/m² arvoa. Koska työn yksi tavoitteesta oli mallintaa auringon valoa eri olosuhteissa, täytyy silloin säteilyn teho olla laitteistossa 1000 W/m². Mikäli haluttaisiin testata säteilyn vaikutusta esim. satelliitteihin, täytyisi säteilyn teho olla 1353 W/m². Tarkoitus on kuitenkin mallintaa olosuhteita maan pinnalla (World Energy Council).

48 % auringon säteilystä on näkyvää valoa, joten tällöin näkyvän valon teho

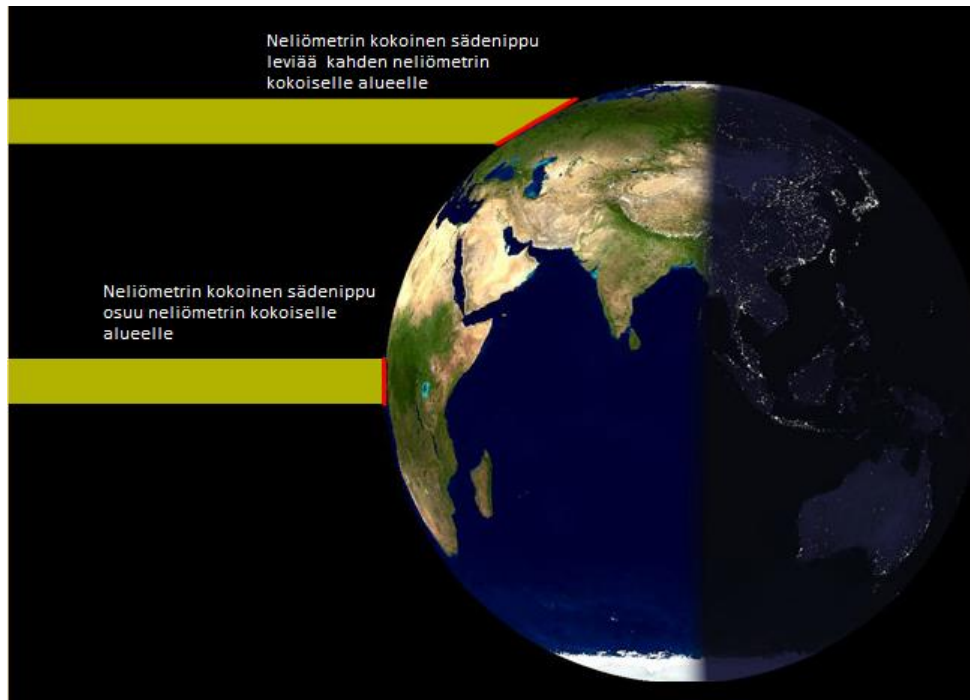
$$P_{\text{näkyvä}} = 0,48 \cdot 1000 \text{ W} = 480 \text{ W}.$$

45,8 % auringon säteilystä on infrapunasäteilyä, joten infrapunasäteilyn osuus on

$$P_{\text{ir}} = 0,458 \cdot 1000 \text{ W} = 458 \text{ W}.$$

3.1.1 Pilvetön sää

Pilvetöntä säätä simuloitaessa auringon valon teho määräytyy simuloitavan kohteen sijainnin mukaan. Koska osa auringon valosta heijastuu ilmakehästä takaisin avaruuteen ja osa absortoituu ilmakehään, vaimenee säteily maan pintaa lähestyttäessä. Maan planeetaarisien ominaisuuksien takia auringon säteily ei jakaudu maapallolle tasaisesti. Päiväntasaajalla valo kulkee lyhyemmän matkan ilmakehän läpi kuin esimerkiksi Suomessa. Lisäksi päiväntasaajalla auringon säteily kohdistuu pienemmälle pinta-alalle kuin esimerkiksi Suomessa. Kuvio 13 havainnollistaa tilannetta (Opetushallitus).

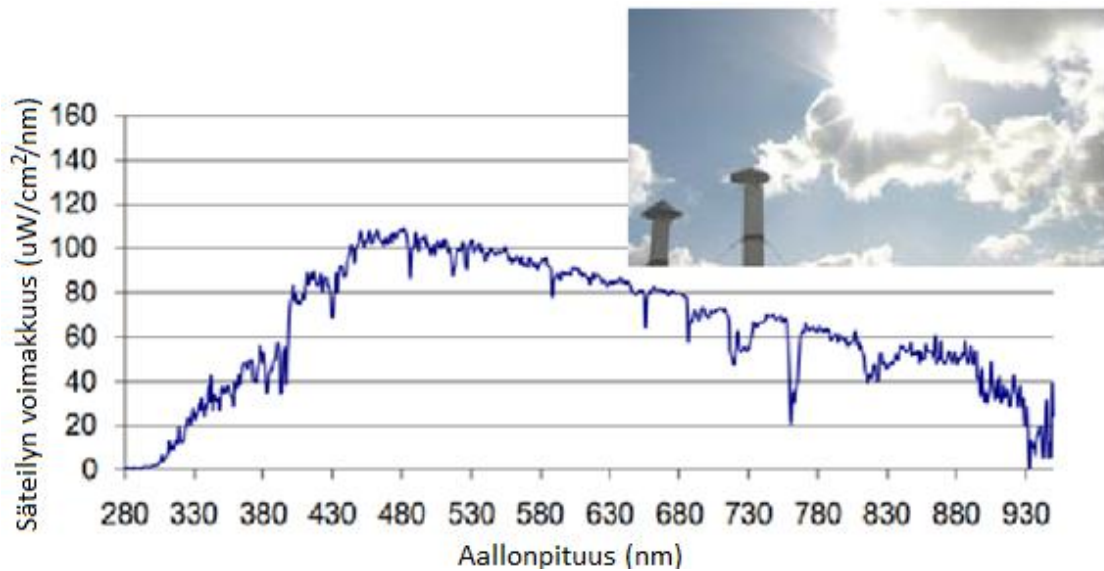


KUVIO 13. Säteilyn jakautuminen (NESTA 2012)

Kun aurinko on kohtisuorassa päiväntasaajan kanssa, on Suomessa silloin noin puolet pienempi säteilyn voimakkuus kuin päiväntasaajalla. Maaliskuun 19.-20. päivien välillä on kevätpäiväntasaus, jolloin aurinko paistaa kohtisuoraan päiväntasaajalle (Suomen luonto).

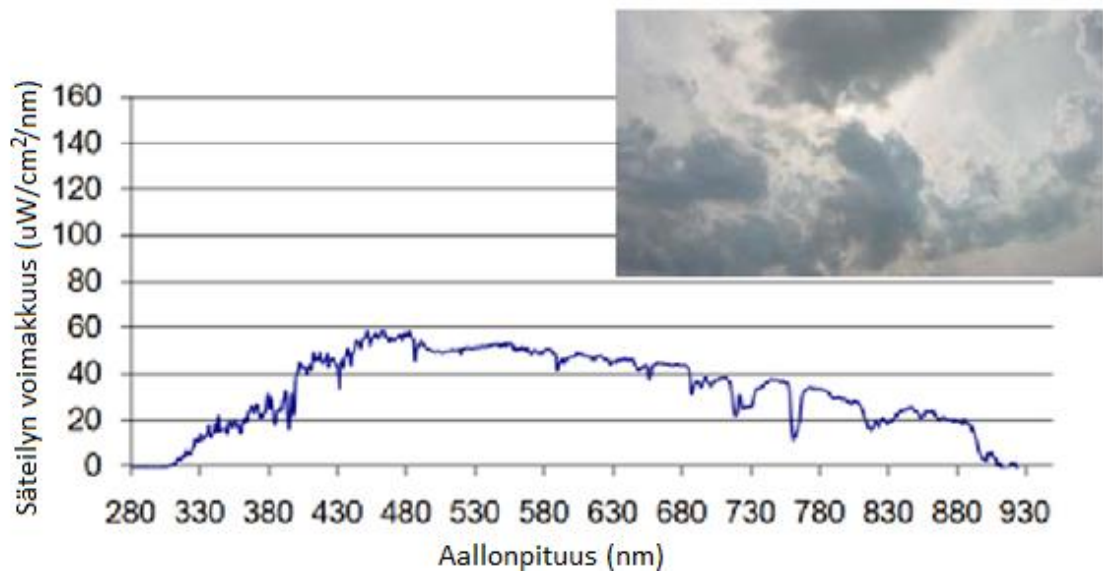
3.1.2 Pilvinen sää

Pilvisellä säällä paneeliin ei kohdistu suoraa auringon valoa. Tällöin paneeliin tuleva valo on hajasäteilyä. Ilmakehässä olevat kaasut ja pilvet vaikuttavat myös valon spektriin. Kuviossa 14 on suoran auringonvalon spektri ja kuviossa 15 on valon spektri kun aurinko on pilven takana. Kuvista voidaan huomata, että valon kaikki aallonpituudet vaimenevat, mutta kaikki eivät vaimene yhtä paljon (Song, Miller & Garmire 2010).



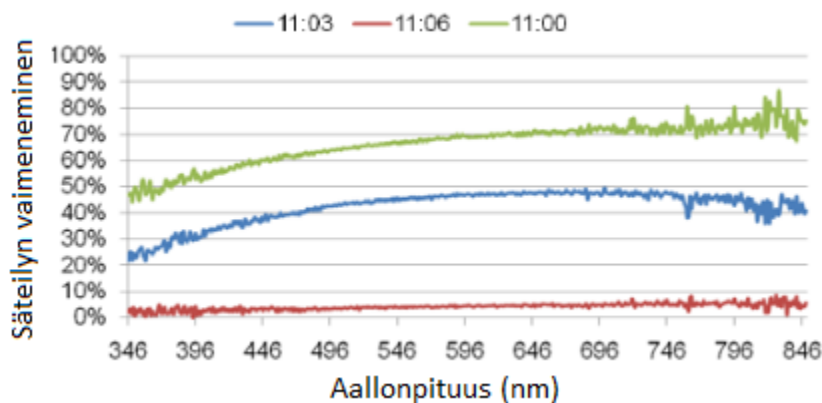
KUVIO 14. Selkeän sään spektri (Song, Miller & Garmire 2010)

Kuvassa vaaka-akselilla on aallonpituus nanometreinä ja pysty-akselilla säteilyn voimakkuus on ilmoitettu $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$. Pysty-akseli ilmoittaa siis kuinka paljon on säteilyn teho 1 cm^2 kokoisella alueella.



KUVIO 15. Pilvisen sään spektri (Song, Miller & Garmire 2010)

Kuvassa 15 säteilyn voimakkuus on pienentynyt huomattavasti, kun verrataan kuvaajaa suoran auringon säteilyn spektriin. Kuvassa 18 on suhteellinen säteilyn voimakkuuden vaimeneminen tietyllä aallonpituudella.



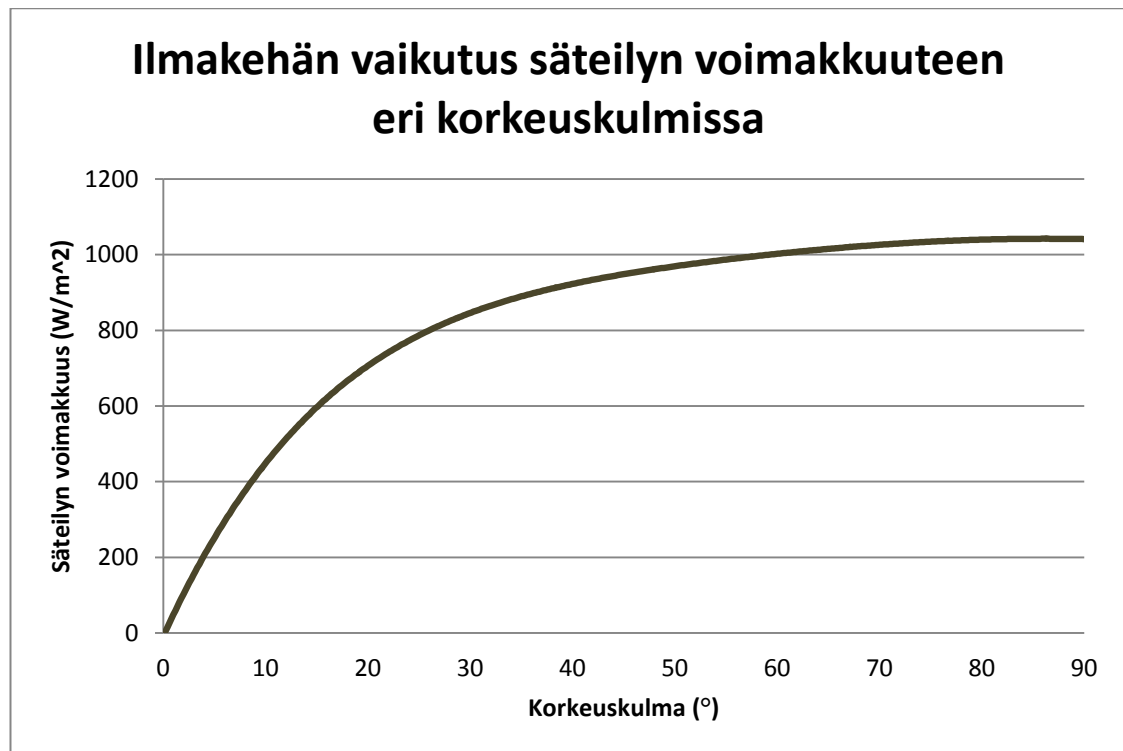
KUVIO 16. Säteilyn vaimeneminen (Song, Miller & Garmire 2010)

Kuviossa 16 on esitetty kuvaajat eri aallonpituuksien vaimenemisesta pilvien vaikutuksesta. Vaaka-akselilla on aallonpituus nanometreinä ja pysty-akselilla säteilyn prosentuaalinen vaimeneminen. Mittaukset on otettu lyhyeltä aikaväliltä vaihtelevissa sääolosuhteissa. Kolme kuvaajaa on verrattu spektriin, jolloin saatiin suurin säteilymäärä. Kuvaajasta nähdään, että eri aallonpituudet eivät vaimene samalla tavalla. Ultravioletisäteily vaimenee suhteessa vähemmän kuin näkyvä valo.

Pilvistä säää mallintaessa on siis kyettävä säätämään valaistuksen tehoa. Täydellistä simulaatiota pilvisestä säästä on vaikea tehdä, koska pilvinen sää ei ole aina samanlainen. Kuvioista 14 ja 15 voidaan kuitenkin hahmottaa miten säteily suurinpiirtein käyttäytyy. Mikäli pilvien vaikutusta mallinnettaisiin täydellisesti, täytyisi spektriä pystyä muokkaamaan siten, että uv ja sinertävä valo eivät vaimenisi yhtä paljon. Koska paneelien vaste ei ole niin merkittävä uv-säteilyn alueella, ei kuitenkaan ole välttämätöntä lähteä hienosäätämään valaistuksen spektriä.

3.2 Korkeuskulma

Koska maapallo on pyöreä, ei auringon sijainti taivaalla ole sama eri puolella maapalloa. Lisäksi auringon nousun ja laskun aikaan auringon sijainti taivaalla vaihtuu. Kuviossa 17 on kuvaaja, josta nähdään miten ilmakehä vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen. Ilmakehän vaikutus säteilyyn laskettiin AM-luvun avulla kaavoilla 2 ja 3. Laskettujen arvojen perusteella piirrettiin kuvion 17 mukainen kuvaaja.

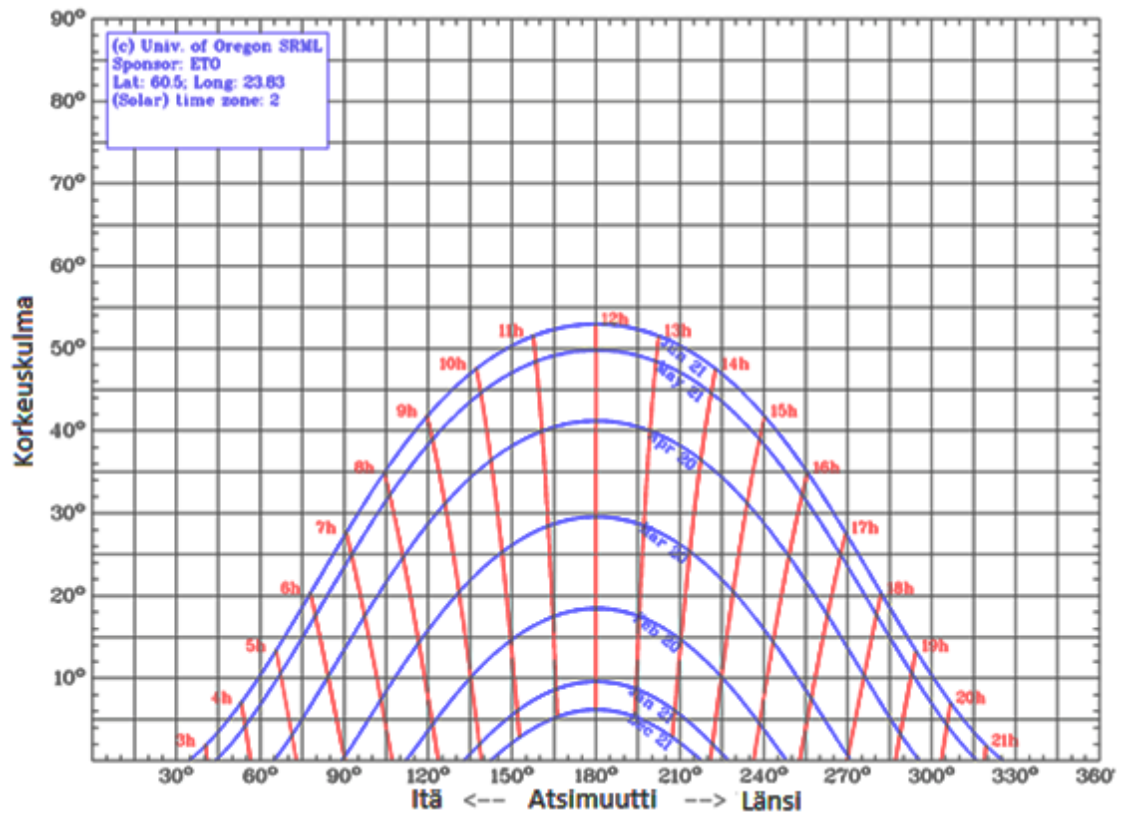


KUVIO 17. Korkeuskulman vaikutus säteilyn voimakkuuteen

Kuviossa on pystyakselilla säteilyn voimakkuus ja vaaka-akselilla korkeuskulma. Kuviossa on mukana vain ilmakehän vaikutus säteilyyn. Kuvioista nähdään, että auringon paistaessa kohtisuoraan yläpuolelta, säteily on suurimmillaan, koska ilmakehän vaikutus on tällöin pienimmillään. Tällöin valolla on edessä vain yksi ilmakehä, eli kyseessä on AM1-tilanne. Auringon nousun ja laskun aikaan säteilyn teho vaimenee ilmakehän ansiosta (Suntekno).

3.2.1 Suomi

Kuviossa 18 on Tampereen seudulta kuvaaja, josta ilmenee auringon korkeus eri vuodenaikoina ja kellonaikoina. Kello 12 aurinko on aina korkeimmillaan riippumatta vuodenaikasta. Todellisuudessa esim. Helsingissä aurinko on etelässä ja korkeimmillaan taivaalla klo 12:04-12:34. Tämä johtuu siitä, että Helsingissä ei noudateta Helsingin paikallista aikaa, vaan vyöhykeaikaa. Lisäksi kesällä kesäaika siirtää aikaa tunnilla eteenpäin (Karttunen).



KUVIO 18. Auringon kulmat eri vuodenaikoina (University of Oregon)

Kuviosta voidaan laskea auringon valon osumakulma paneeliin. Kuviosta on pystyakselilla auringon korkeuskulma ja vaaka-akselilla atsimuutti. Atsimuutti kertoo suunnan asteina. Kuviosta pohjoinen on 0° ja 360° . Itä on 90° , etelä 180° ja länsi 270° .

Yleinen ohjeistus aurinkopaneelin asennukseen on, että paneeli asennetaan etupuoli etelän suuntaan ja paneeli asennetaan 45° kulmaan. Tällöin aurinko on kohtisuorassa paneelin etupintaan nähden klo 12 huhtikuun lopun ja toukokuun alun tienoilla (Naps Systems Oy 2009).

Kuviosta 18 voidaan laskea paneelin ja auringon väliset kulmat eri kellonajoille, kun paneeli on 45° kulmassa ja paneelin etupinta osoittaa kohti etelää. Taulukossa 2 on taulukoituna paneelin kulma ja auringon kulma itä-länsi-suunnassa. Kulmat on saatu vähentämällä paneelin kulmasta auringon kulma.

TAULUKKO 2. Kesäkuun aikana paneelin ja auringon väliset kulmat

Klo	Paneelin kulma (°)	Auringon kulma (°)	Paneelin ja auringon välinen (°)
3	180	40	140
4	180	50	130
5	180	65	115
6	180	80	100
7	180	90	90
8	180	105	75
9	180	120	60
10	180	140	40
11	180	160	20
12	180	180	0
13	180	200	-20
14	180	220	-40
15	180	240	-60
16	180	255	-75
17	180	270	-90
18	180	280	-100
19	180	295	-115
20	180	310	-130
21	180	320	-140

Taulukosta voidaan todeta, että kesäkuussa aurinko paistaa suoraan paneelin sivusta klo 7, jonka jälkeen suora auringon valo alkaa osua paneelin etupintaan. Vaikka aurinko nousee klo 3, paistaa aurinko tuolloin paneelin takaa, joten suoraa auringon valoa ei paneelin etupintaan osu. Tällöin paneeliin osuu vain hajasäteilyä, joten paneelin tuotto on huomattavasti pienempi verrattuna siihen, että aurinko paistaisi suoraan paneeliin. Savonian ammattikorkeakoulun Varkauden tekniikan toimipisteessä suoritettujen mittauksien mukaan aurinkoisena päivänä saadaan n. 45 % enemmän sähköenergiaa kääntyvällä järjestelmällä. Kääntyvässä järjestelmässä paneeli seuraa aurinkoa ja valo tulee aina kohtisuoraan paneeliin. Tuottoon vaikuttaa kuitenkin säätila ja keskimäärin kääntyvä järjestelmä tuottaa n. 30 % enemmän sähköenergiaa (Suntekno, Aurinkopaneelien tehontuottomittauksia).

Taulukossa 3 on taulukoitu kesäkuun ajalta auringon ja paneelin kulmat siitä hetkestä, kun auringon suora valo osuu paneelin etupintaan.

TAULUKKO 3. Kesäkuun auringon korkeuden ja paneelin välinen kulma

Klo	Paneelin kulma (°)	Auringon kulma (°)	Paneelin ja auringon välinen (°)
7	45	27	18
8	45	35	10
9	45	42	3
10	45	47	-2
11	45	52	-7
12	45	53	-8
13	45	52	-7
14	45	47	-2
15	45	42	3
16	45	35	10
17	45	27	18

Taulukosta nähdään, että korkeussuunnan kulmaerot eivät ole yhtä suuret mitä sivusuunnassa. Korkeussuunnan kulmavaihtelut eivät ole siis niin merkittäviä paneelin sähkötuotannossa. Liitteessä 2 on auringon ja paneelin väliset erot korkeus ja sivusuunnassa, kun paneeli on 45 ° kulmassa eteläänpäin.

Korkeuskulmien avulla voidaan laskea kaavan 4 avulla suurinpiirteinen säteilyn voimakkuus (Nasa 1999).

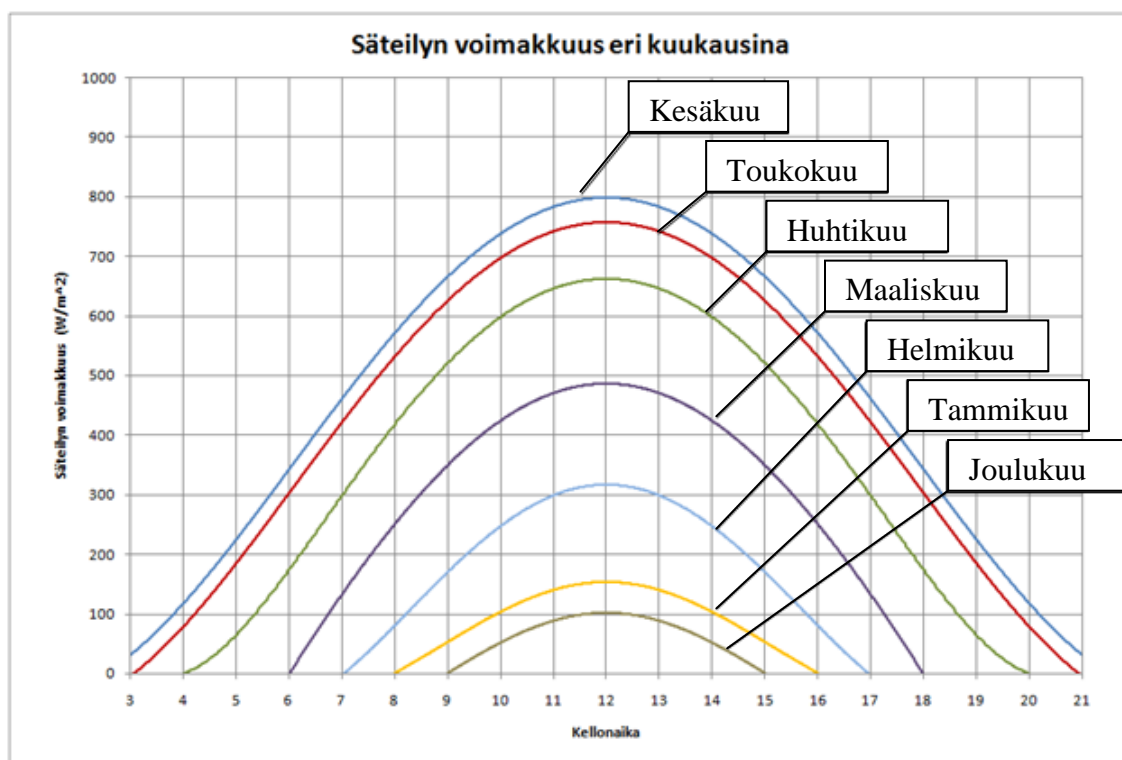
$$S = S_0 * \sin \alpha \quad (4)$$

S = säteilyn voimakkuus [W/m^2]

S_0 = säteilyn voimakkuus, kun aurinko on suoraan yläpuolella [$\approx 1000 \text{ W}/\text{m}^2$]

α = auringon korkeuskulma

Lasketuista arvoista on piirretty kuvion 19 mukainen kuvaaja, jossa on säteilyn voimakkuudet eri kuukausina Tampereen seudulla. Lasketut arvot kuvaavat säteilyn voimakkuutta optimaalisissa sääolosuhteissa. Lasketuissa arvoissa ei ole esim. pilvisyyden vaikutusta huomioitu. Aikaisemmin todettiin, että kevätpäiväntasauksen aikana Suomessa on noin puolta pienempi säteilyn voimakkuus kuin päiväntasaajalla. Kuviosta voidaan todeta, että kevätpäiväntasauksen aikaan maaliskuussa säteilyn voimakkuus on n. $500 \text{ W}/\text{m}^2$, joka on puolet päiväntasaajan $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ säteilystä.

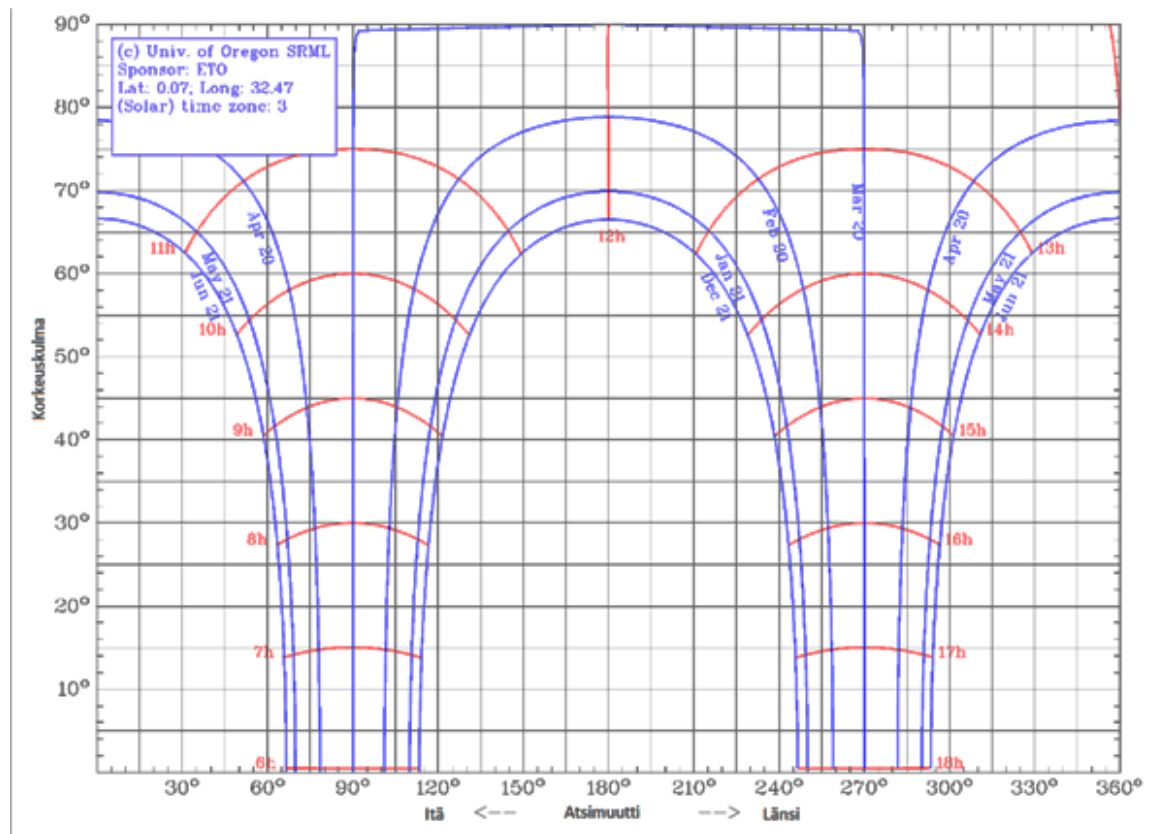


KUVIO 19. Säteilyn voimakkuus eri kuukausina Tampereella

Mallinnettaessa päiväkohtaista paneelin tuottoa, voidaan kuviosta 19 katsoa säteilyn voimakkuus tietyinä kellonaikana. Valaistuksen teho säädetään tällöin kuvion käyrien mukaiselle tasolle. Kuvaajassa on vain osa kuukausista, koska muut kuukaudet noudattavat samoja käyriä. Esimerkiksi heinäkuu vastaa toukokuun käyrää ja elokuu vastaa huhtikuun käyrää ja niin edelleen.

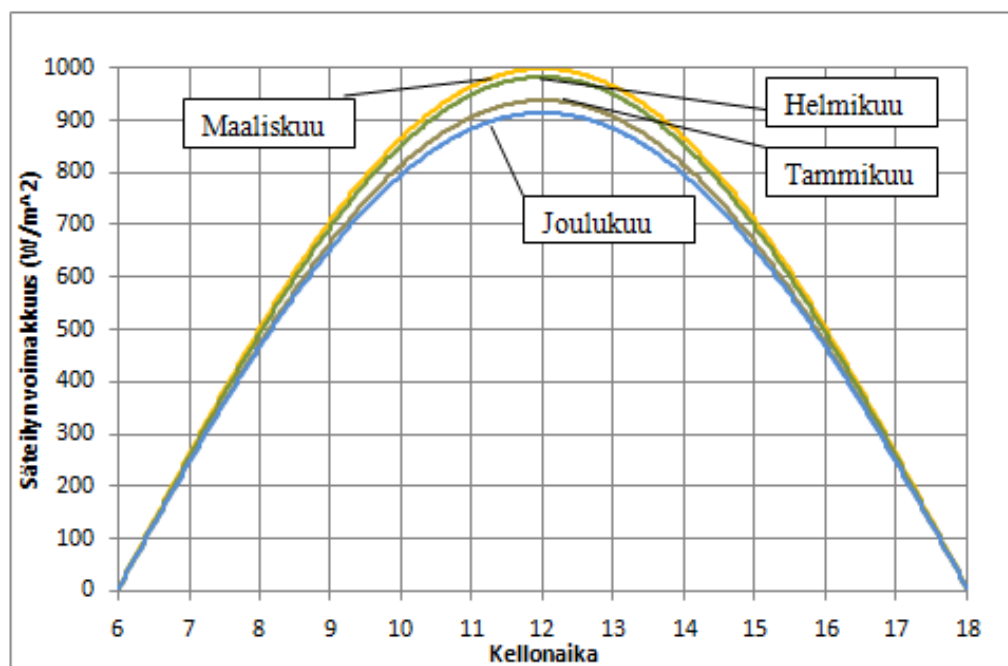
3.2.2 Päiväntasaaja

Kuviossa 20 on auringon kiertoradat päiväntasaajalla. Suomen ja päiväntasaajan kuvaajissa on selvä ero. Päiväntasaajalla aurinko kulkee suoraan yläpuolelta maaliskuussa. Joulukuussa keskipäivällä aurinko ei kulje suoraan yläpuolelta, vaan 66° kulmassa etelän puolelta. Kesäkuussa aurinko kulkee vastaavasti pohjoispuolelta.



KUVIO 20. Päiväntasaajan korkeuskulmat eri vuodenaikoina (University of Oregon)

Säteilyn voimakkuudesta piirrettiin kuvion 21 mukainen kuvaaja kaavan 4 avulla. Kuviossa ei näy kaikkia kuukausia, koska loput kuukaudet noudattavat samoja käyriä. Maaliskuun jälkeen huhtikuun säteilyn voimakkuus on sama kuin helmikuussa jne.



KUVIO 21. Säteilyn voimakkuus päiväntasaajalla eri kuukausina

3.3 Laitteistovaatimukset

Auringon simuloinnissa täytyy siis saada säteilyn tehoksi $0-1000 \text{ W/m}^2$. Eri vuodenaikojen, kellonaikojen ja pilvisyyden aiheuttama säteilyn vaihtelu täytyy saada toteutettua säätämällä valaistuksen tehoa. Laitteistolta vaaditaan säteilytehon lisäksi spektri, joka vastaa auringon valoa.

Mallinnettaessa auringon sijaintia taivaalla, täytyy paneelin olla liikuteltavissa vaakatasosta $0-90^\circ$ joka suuntaan. Tällöin voidaan mallintaa auringon kiertoradat taivaalla.

4 LAITTEISTO

Laitteistoa valittaessa on otettava huomioon edellä tutkitut asiat. Valaisinta valittaessa on kiinnitettävä huomiota valaisimen tuottamaan valon spektriin. Valaisimien teho on oltava myös riittävä, jotta saadaan tuotettua tarpeeksi suuri teho neliömetriä kohti. Valaisimet ovat työn kannalta oleellisin asia. Jos valaistus ei vastaa auringon valoa, ei niiden ympärillä oleva laitteisto korjaa tilannetta.

4.1 Standardit

ASTM E927-05-standardissa on määritelty auringon valon simuloimiseen vaadittavat tekijät. ASTM E927-05-standardin mukaan valonlähteeltä vaaditaan kolmea asiaa.

-Valonlähteen spektri on vastattava auringon valon spektriä.

-Valon on oltava tasainen.

-Valon on oltava ajallisesti vakaa

Auringon simulointiin on olemassa myös IEC 60904-9-standardi sekä JIS C 8912-1998-standardi, joka on piiaurinkokennoille suunnattu standardi. Aurinkon simulointilaitteet jaotellaan A, B ja C luokkaan niiden ominaisuuksien mukaan. Taulukossa 4 on luokituksen vaatimukset. (Newport, Oriel Sol1A Class ABB Solar Simulators)

TAULUKKO 4. Standardien luokat (EYE Lighting International of North America)

Standardi			
	ASTM	IEC	JIS
Spektrin vastaavuus			
Luokka A	0.75-1.25	0.75-1.25	0.75-1.25
Luokka B	0.6-1.4	0.6-1.4	0.6-1.4
Luokka C	0.4-2.0	0.4-2.0	0.4-2.0
Säteilyn tasaisuus			
Luokka A	3 %	2 %	2 %
Luokka B	5 %	5 %	3 %
Luokka C	10 %	10 %	10 %
Ajallinen vakaus			
Luokka A	2 %	2 %	1 %
Luokka B	5 %	5 %	3 %
Luokka C	10 %	10 %	10 %

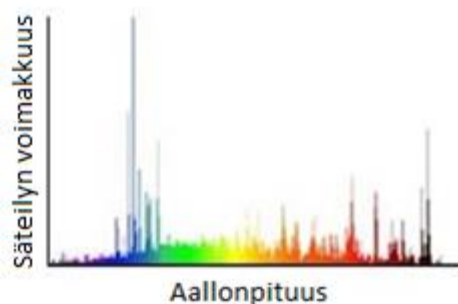
Taulukossa 5 on standardin mukainen AM1,5G spektrin jakauma. Tässä työssä valon spektriä täytyy verrata AM1,5G spektriin, jonka kokonaisteho on 1000 W/m^2 . Se on tarkoitettu tasaisen pinnan tutkimiseen. AM1,5D kokonaissäteilyn voimakkuus on 900 W/m^2 . Siinä on mukana vain auringon suora säteily, jolloin hajasäteily ei vaikuta siihen. AM1,5D spektri on tarkoitettu laitteille, jotka keskittävät säteilyn esim. peilien avulla pienemmälle alalle. (Pveducation, Solar spectra)

TAULUKKO 5. AM1,5G säteilyn jakautuminen (EYE Lighting International of North America)

Aallonpituus	Prosentuaalinen osuus kokonaissäteilystä (400-1100)
400 - 500	18.4%
500 - 600	19.9%
600 - 700	18.4%
700 - 800	14.9%
800 - 900	12.5%
900 - 1,100	15.9%

4.1.1 Ksenonvalaisin

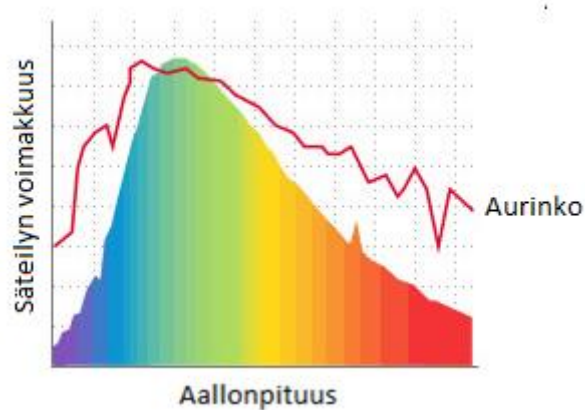
Ksenonvalaisimia on käytetty auringon valon simuloimiseen sen hyvän spektrin takia. Spektri vastaa hyvin auringon valoa, mutta kuten kuviosta 22 huomataan, siinä esiintyy hyvin korkeita piikkejä. Muun muassa Newportin auringonsimulointilaitteissa on käytetty ksenonvalaisinta. (Newport, Solar simulation)



Kuvio 22. Ksenonvalon spektri (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisimet)

4.1.2 Rikkiplasmavalaisin

Rikkiplasmavalaisimen spektri on jatkuva. Se noudattaa hyvin auringon säteilyn spektriä näkyvän valon osalta. Kuviossa 23 on valmistajan ilmoittama kuvaaja valaisimen ja auringon spektristä.



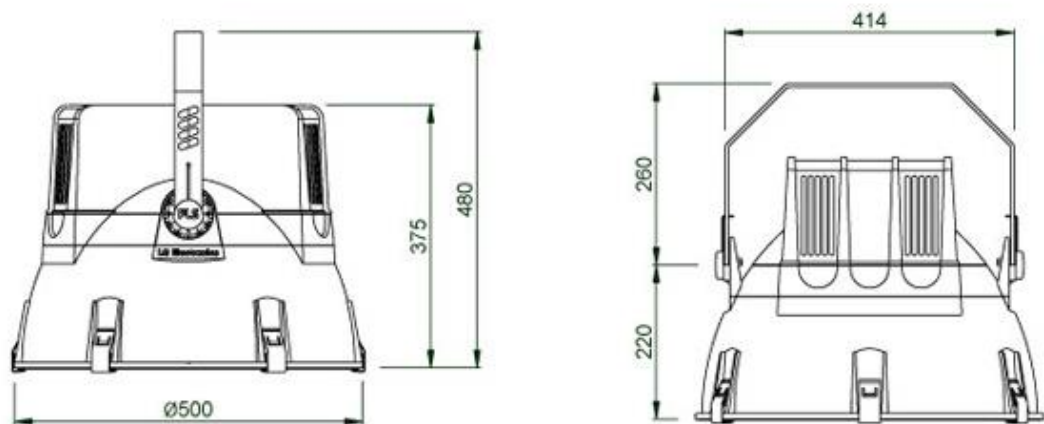
KUVIO 23. Rikkiplasmavalaisimen ja auringon spektri (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisin 730 W)

Rikkiplasmavalaisin tuottaa n. 90-95 % valoa kuluttamastaan sähköstä. Lämpöhäviöt ovat siis pienet. Koululle on hankittu 2 kappaletta 730 W valaisinta. Valaisimen hyötysuhteella voidaan siis tuottaa valoa n. 660 watin teholla. Jotta valaistus vastaisi luonnollista auringon valoa, täytyy olla vähintään 2 kpl kyseisiä valaisimia, jolloin valotehoksi saadaan n. 1320 W. Valaisin on kuvan 3 mukainen. Valaisinta pystytään himmentämään n. 15 % vaikuttamatta valon spektriin.



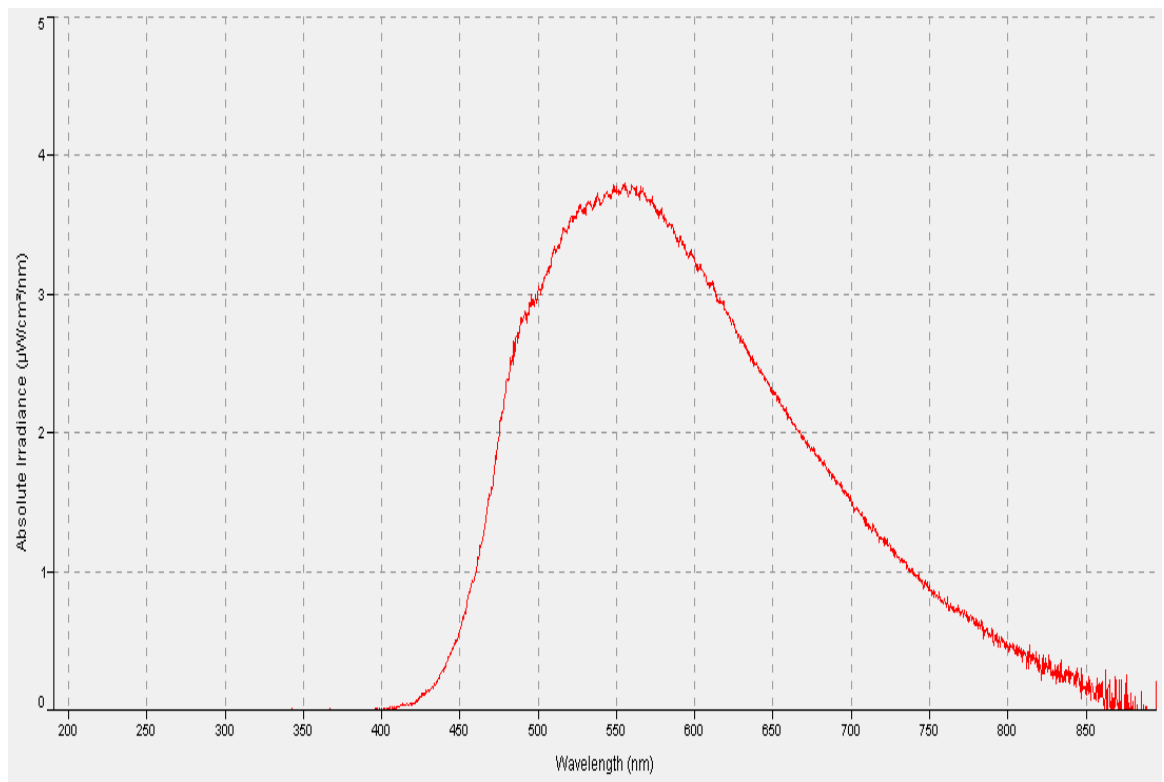
KUVA 3. Rikkiplasmavalaisin (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisin 730 W)

Kuviossa 24 on valaisimen mitat. Valaisin painaa 19 kg.



KUVIO 24. Rikkiplasmavalaisimenmitat (VP-Lux, PSH0731B)

Kuvassa 25 on Oulun yliopiston tekemä mittausspektri valaisimen spektristä. Kuvasta nähdään, että spektri noudattaa valmistajan ilmoittamaa spektrin muotoa.



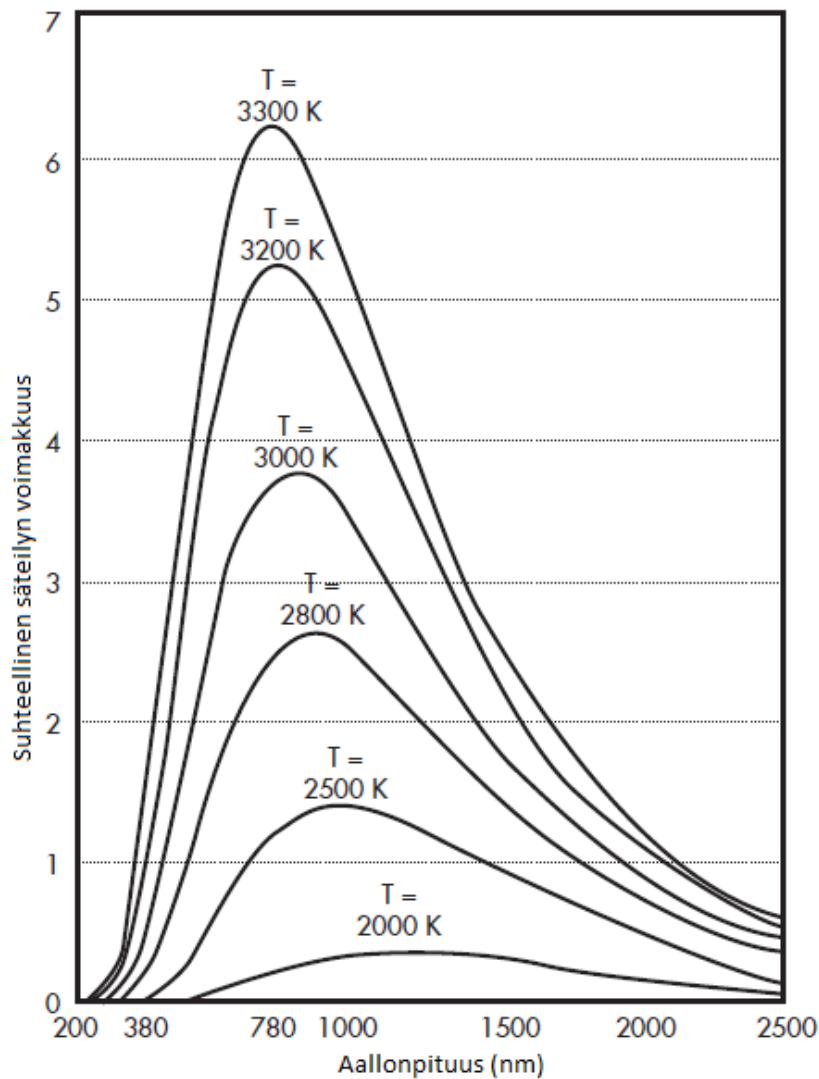
KUVIO 25. Rikkiplasmavalaisimen spektri (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisimet)

Rikkiplasmavalaisimilla yksistään voitaisiin mallintaa auringon valoa näkyvän valon osalta. Valaisin soveltuisi siis valonlähteeksi paneeleille, joiden vaste on näkyvien aallonpituuksien rajoissa. Infrapunasäteilyä valaisin ei tuota tarpeeksi, joten mikäli halutaan mallintaa auringon valoa myös infrapunasäteilyn osalta, täytyy rikkiplasmavalaisimen rinnalle asentaa toinen valaisin, joka tuottaa tarvittavan infrapunasäteilyn.

4.1.3 Halogeenivalaisin

Edellä mainitun rikkiplasmavalaisimen infrapunasäteily ei vastaa auringon infrapunasäteilyä. Halogeenilamppu tuottaa infrapunasäteilyä paremmin kuin rikkiplasmavalaisin. Kuviossa 26 on esimerkkejä eri lämpöisten halogeenivalaisimien spektristä.

Rikkiplasmavalaisin tuottaa säteilyä n. 900 nm aallonpituuteen saakka ja halogeenilampulla säteilyn huippu on n. 900-1000nm aallonpituuksilla, kun kyseessä on 2500 K tai 2800 K halogeenivalaisin. Kun halogeenivalaisimien teho mitoitetaan oikein, saadaan spektristä muokattua auringon valoa vastaava koko spektrin osalta. Halogeenivalaisin tuottaa tarvittavan infrapunasäteilyn ja vahvistaa rikkiplasmavalaisimen heikkoa keltaisen ja punaisen aallonpituuksien aluetta. Halogeenivalaisin tuottaa infrapunasäteilyä 2500 nm saakka, kuten auringon säteilykin.



KUVIO 26. Halogeenilamppujen spektri (LOT-Oriel Group Europe)

Auringon säteilystä 45,8 % on infrapunasäteilyä, joten 1000 W tehosta 458 W on infrapunasäteilyä. Halogeenilampun tuottama teho on oltava siis yli 458 W, koska osa halogeenilampun säteilystä on valoa. Halogeenivalaisimet ovat täysin himmennettävissä, joten tehon säätö ei ole ongelma. Ne tuottavat valoa noin 30 % enemmän kuin hehkulamppu. Hehkulamppu tuottaa vain n. 5 % valoa. Tällöin halogeenilamppukin tuottaa vain vajaa 10 % näkyvää valoa (Oy Airam Electric Ab, Halogeenilamput; Motiva).

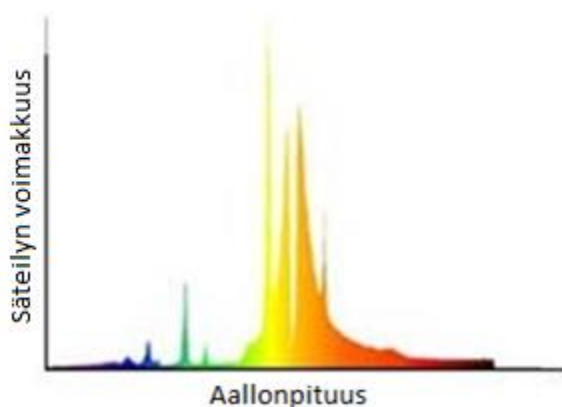
Koska rikkiplasmavalaisimia täytyy olla kaksi kappaletta, on järkevää asentaa myös kaksi halogeenivalaisinta. Tällöin valaistuksen säätäminen on helpompaa. Säteily voidaan puolittaa sammuttamalla toinen rikkiplasmavalaisin ja toinen halogeenivalaisin.

Kun valaisimia on kaksi kappaletta, täytyy toisen valaisimen tuottaa 229 W. Tällöin 500 W halogeenivalaisin kykenee tuottamaan tarvittavan säteilytehon. N. 450 W on

tällöin infrapunasäteilyä. Koska halogeenivalaisimissa ei ole ilmoitettu heijastuskulmaa, suurin piirteistä etäisyyttä ei pystytä laskemaan. Tarvittava etäisyys voidaan laskea, kun laitteisto on hankittu ja halogeenivalaisimen heijastuskulma on tiedossa. Etäisyyden määrittäminen on mahdollista myös mittaamalla säteilyn voimakkuus. Neliömetrin kokoiselle alueelle on osuttava noin puolet halogeenivalaisimien valosta, jotta saadaan tuotettua tarvittava infrapunasäteily.

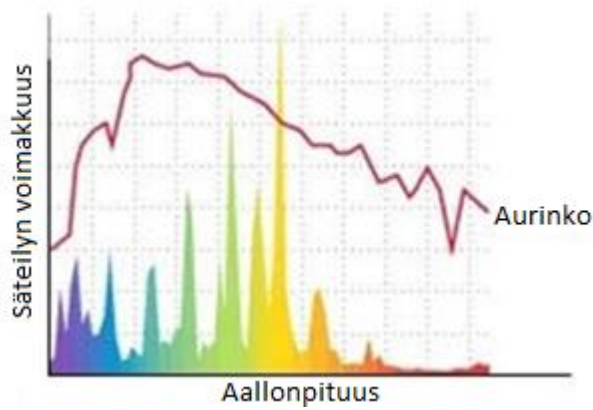
4.1.4 Muut valaisimet

Markkinoilta löytyy paljon valonlähteitä, mutta auringon valon spektriä vastaavia ei ole paljoa tarjolla. Monien valojen spektrit ovat epäjatkuvia, eli niiden spektri on piikikästä. Ne eivät siis välttämättä sisällä jokaista aallonpituutta laisinkaan. Kuvio 27 on esimerkiksi suurpainenatriumvalaisimen spektristä. Valo on hyvin kellertävää, koska se sisältää suurimmaksi osaksi kellertävän valon aallonpituuksia.



KUVIO 27. Suurpainenatriumvalaisin (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisimet)

Kuviossa 28 on esimerkki monimetallivalaisimen spektristä. Valossa on jokaista aallonpituutta, mutta spektri on hyvin piikikäs.



KUVIO 28. Monimetallivalaisin (VP-Lux, Rikkiplasmavalaisimet)

Kyseiset valaisimet eivät sovellu auringon valon simuloimiseen, koska ne eivät noudata auringon spektrin muotoa.

4.2 Paneelin etäisyys valaisimesta

Valaisimen ja paneelin etäisyyden määrittämiseen tarvitaan laskentoja. Mikäli valaisimen heijastuskulma on 120° , voidaan laskea neliömetrin kokoisen paneelin lähin etäisyys valaisimeen. Tällöin valo leviää koko paneelille.

Ympyrän pinta-ala

$$A = \pi * r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (5)$$

Neliön pinta-ala

$$A = s^2 = \frac{d^2}{2} \quad (6)$$

Kun neliö sijoitetaan ympyrän sisälle niin, että neliön kulmat osuvat ympyrän kehälle, saadaan tällöin suurin mahdollinen neliö mahdutettua ympyrään. Tällöin neliön lävistäjän pituus on ympyrän halkaisijan pituus.

Kun neliön pinta-ala on 1 m^2 , on silloin neliön sivun pituus 1 m ja lävistäjä tällöin

$$d = \sqrt{2} * s = \sqrt{2} * 1\text{ m} = 1,41\text{ m}$$

Tällöin ympyrän pinta-ala

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi * (1,41\text{ m})^2}{4} = 1,56\text{ m}^2$$

Neliön prosentuaalinen osuus ympyrän pinta-alasta on $\frac{1\text{ m}^2}{1,56\text{ m}^2} * 100\% = 64\%$

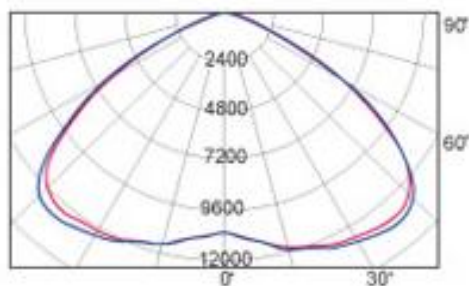
Valaisimen hyötysuhde on 90-95 %, joten 730 W tehosta muuttuu valoksi n. 675 W.

Tällöin neliömetrin kokoiselle alueelle osuva valoteho on

$$P = 0,64 * 675\text{ W} = 432,45\text{ W}$$

Aikaisemmin laskettiin, että auringon valossa on 480 W tehoa näkyvän valon taajuuksilla. Äskeisen laskelman perusteella yksi valaisin ei riitä tuottamaan tarvittavaa valotehoa.

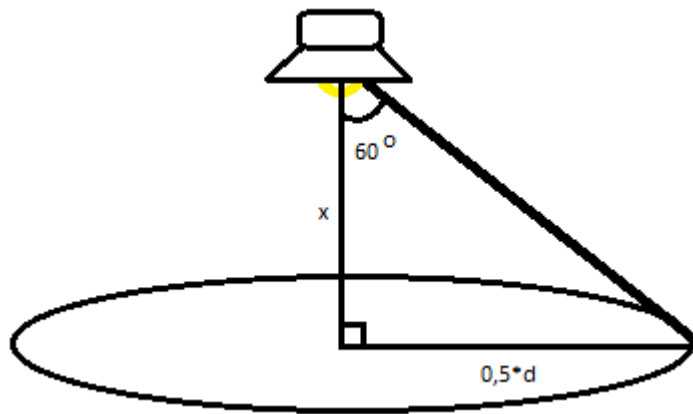
Paneelin etäisyyteen vaikuttaa valaisimen heijastuskulma. Mitä leveämpi heijastuskulma on, sitä leveämmälle valaisimesta lähtevä valo leviää. Kuviossa 29 on valaisimen valon jakautumisen kuvaaja.



KUVIO 29. Valon jakautuminen (PlasmaBright 2010)

Kuvassa näkyy valon jakautuminen, kun valaisin on kuvan yläosassa keskellä. Pystyakselilla on etäisyys ilmoitettu millimetreinä.

Koululla on valmiina kaksi 120 ° heijastuskulmalla olevaa valaisinta. Tällöin valaisimen ja paneelin etäisyyttä kuvastaa kuvion 30 mukainen tilanne.



KUVIO 30. Etäisyyden laskenta

Ympyrän halkaisijan avulla voidaan laskea etäisyys lampusta, kun valon kulma tiedetään valaisimessa. Aikaisemmin laskettiin neliömetrin kokoiselle neliölle sopivan kokoinen ympyrä. Ympyrän halkaisija oli 1,41 m.

Tällöin voidaan ratkaista kuvista 30 paneelin ja valaisimen etäisyys x .

$$\tan 60^\circ = \frac{0,5 * d}{x} \rightarrow x = \frac{0,5 * d}{\tan 60^\circ} = \frac{0,5 * 1,41 \text{ m}}{\tan 60^\circ} = 0,407 \text{ m}$$

Mikäli valaisimen heijastuskulma on 120° , saadaan yhdellä valaisimella n. 432 W teho neliömetrille, kun paneeli on noin 41 cm päässä valaisimesta.

4.2.1 Etäisyys kahdella valaisimella

Edellä laskettiin, että yksi valaisin ei riitä tuottamaan tarpeeksi tehoa näkyvän valon aallonpituuksilla. Kahden valaisimen etäisyys lasketaan kuvion 30 tavalla, mutta kuvion valaisimen viereen on sijoitettu toinen valaisin. Neliömetrille tarvitaan 480 W teho, joten jos se teho jaetaan kahdelle valaisimelle, täytyy yhdestä valaisimesta saada 240 W/m^2 .

Suoritetaan laskelmia, kuten aikaisemmassa laskennassa, mutta eri järjestyksessä.

Tiedetään, että halutaan 240 W teho neliömetrille yhdellä valaisimella, joten lasketaan kuinka suuren prosentuaalisen alan täytyy neliön täyttää ympyrästä, jotta se saavutetaan. Lampusta lähtee 675 W valotehoa.

$$\frac{240 \text{ W}}{675 \text{ W}} * 100 \% = 35,6 \%$$

Neliömetrin kokoisen alueen täytyy siis peittää 35,6 % kokoinen alue, jotta valosta saadaan 240 W. Tällöin ympyrän pinta-alan täytyy olla

$$\frac{1 \text{ m}^2}{A} * 100\% = 35,6 \% \rightarrow A = \frac{1 \text{ m}^2}{35,6 \%} * 100\% = 2,81 \text{ m}^2$$

Kun ympyrän pinta-ala on $2,81 \text{ m}^2$, on silloin sen halkaisija

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \rightarrow d = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,81 \text{ m}^2 * 4}{\pi}} = 1,89 \text{ m}$$

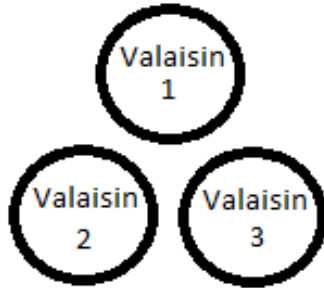
Tällöin voidaan ratkaista paneelin ja valaisimen etäisyys x .

$$\tan 60^\circ = \frac{0,5 * d}{x} \rightarrow x = \frac{0,5 * d}{\tan 60^\circ} = \frac{0,5 * 1,89 \text{ m}}{\tan 60^\circ} = 0,55 \text{ m}$$

Valaisimien etäisyys täytyy siis olla n. 55 cm, jotta kahdesta valaisimesta saadaan tarpeeksi valotehoa. Etäisyys valaisimesta ei paljoa kasva vaikka käytetään kahta valaisinta.

4.2.2 Etäisyys kolmella valaisimella

Lisäämällä kolmas valaisin, saadaan etäisyyttä kasvatettua entisestään. Valaisimet sijoitetaan kuvion 31 mukaisesti.



KUVIO 31. Valaisimien sijoittelu ylhäältä päin

Lasketaan edellisen laskun tapaan etäisyys, kun lisätään laskuihin yksi valaisin. Tällöin 480 W teho jakautuu kolmelle valaisimelle, eli yhdestä täytyy saada 160 W tehoa.

Tiedetään, että halutaan 160 W teho neliömetrille yhdellä valaisimella, joten lasketaan kuinka suuren prosentuaalisen alan täytyy neliön täyttää ympyrästä, jotta se saavutetaan. Lampusta lähtee 675 W valotehoa.

$$\frac{160 \text{ W}}{675 \text{ W}} * 100 \% = 23,7 \%$$

Neliömetrin kokoisen alueen täytyy siis peittää 23,7 % kokoinen alue, jotta valosta saadaan 160 W. Tällöin ympyrän pinta-alan täytyy olla

$$\frac{1 \text{ m}^2}{x} * 100\% = 23,7 \% \rightarrow x = \frac{1 \text{ m}^2}{23,7 \%} * 100\% = 4,22 \text{ m}^2$$

Kun ympyrän halkaisija on $4,22 \text{ m}^2$, on silloin sen halkaisija

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \rightarrow d = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,81 \text{ m}^2 * 4}{\pi}} = 2,32 \text{ m}$$

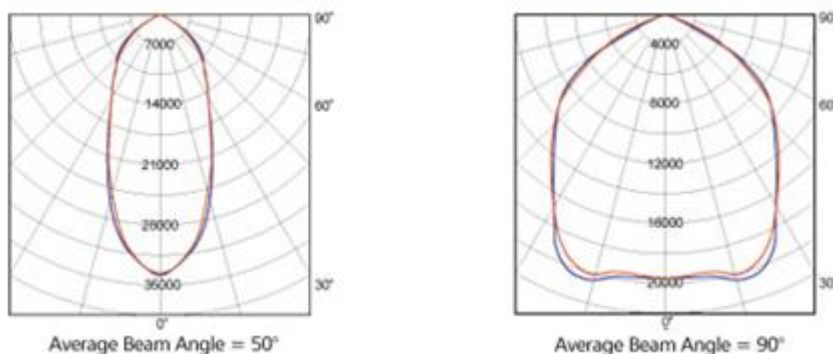
Halkaisijan avulla voidaan ratkaista paneelin ja valaisimen etäisyys x .

$$\tan 60^\circ = \frac{0,5 * d}{x} \rightarrow x = \frac{0,5 * d}{\tan 60^\circ} = \frac{0,5 * 2,32 \text{ m}}{\tan 60^\circ} = 0,66 \text{ m}$$

Valaisimia lisäämällä ei etäisyyttä saada paljoa kasvatettua, koska valo jakautuu niin leveästi, että etäisyyttä kasvattamalla menee iso osa valosta paneelin ohi.

4.2.3 Eri heijastuskulma

Jotta paneelin ja valaisimen etäisyyttä toisistaan voidaan kasvattaa, täytyy heijastuskulmaa muuttaa. Valaisimesta on olemassa 50° ja 90° heijastuskulmalla olevia versioita. Kuviosta 32 voidaan todeta, että vaikka keskimääräinen heijastuskulma onkin pienempi, ei se valaisimen lähellä ole juurikaan 120° heijastuskulmalla varustettua valaisinta pienempi. Valo ei ole niin tasaisesti jakautunut kuin 120° heijastuskulman valaisimessa.



KUVIO 32. Valon jakautuminen 50° ja 90° heijastuskulmalla (Plasmabright)

Kuvista nähdään, että valo kulkeutuu 50° heijastuskulmalla lähes 36 m päähän. Aurinkopaneeli on kuitenkin hyvin lähellä valaisinta, jossa valo leviää n. 60° kulmassa. Keskeimmällä valokeilalla valoteho on suurempi ja tällöin valaistus ei ole niin tasainen reunoille päin mentäessä. Sama pätee 90° heijastuskulmalla varustetuille valaisimille.

Koska yksi standardin vaatimus oli valon tasaisuus, on siis 120° heijastuskulma parempi kuin edelliset kapeamman kulman omaavat valaisimet.

4.3 Valaisimien teho

Edellisien laskemien perusteella yhdellä valaisimella ei saada auringon valoa vastaavaa valotehoa. Laitteisto tarvitsee kaksi rikkiplasmavalaisinta ja kaksi halogeenivalaisinta. Taulukossa 6 on taulukoitu valaisimien tehontarve.

TAULUKKO 6. Valaisimien tehot

Valaisin	Määrä (kpl)	Teho (W)
Halogeenivalaisin 500 W	2	1000
Rikkiplasmavalaisin 730 W	2	1460
	yhteensä:	2460

Taulukosta nähdään, että valaisimien teho on 2460 W. 10 A sulake kestää 2300 W, joten valaisimet tarvivat suojakseen 16 A sulakkeen, joka kestää 3680 W.

Halogeenivalaisimet tuottavat lämpöä n. 900 W ja rikkiplasmavalaisimet n. 150 W. Yhteensä lämpöä syntyy valaisimista siis n. 1050 W.

4.4 Pimennysverho

Laitteiston ympärille täytyy rakentaa pimennysverho, joka estää ympäristön muun valaistuksen pääsyn testattavaan paneeliin. Lisäksi verhous suojaa oppilaita kirkkaalta valaistukselta testauksen aikana.

Kuvan 4 mukainen liikuteltava verhoseinä soveltuu käyttöön hyvin, koska sillä voidaan rajata käyttöön tarvittavan kokoinen alue. Lisäksi seinä on helposti liikuteltavissa paikasta toiseen. Seinän päälle on vain asetettava levy, joka estää ulkopuolisen valon pääsyn seinien sisäpuolelle.



KUVA 4. Liikuteltava verhoseinä (Auramotrukit)

Kuvan mukaisen verhoseinän saa teetettyä asiakkaan toiveiden mukaisesti. Verhomateriaalina käytetään yleensä muovia, mutta asiakas voi vaikuttaa materiaaliin. Verhoseinä saa olla maksimissaan n. 2 metriä, jolloin se voidaan kuljettaa ovista.

4.5 Alusta

Työn tavoitteena oli suunnitella liikuteltava alusta, jonka voi tarpeen tullen viedä pihalle. Jotta vuorokauden eri aikoja voidaan mallintaa, täytyy paneelin alustan kääntyä 90 ° joka suuntaan.

Valmista pöytää, jossa tällainen ominaisuus on, ei löytynyt. On olemassa erilaisia ratkaisuja teollisuuden työstökoneisiin, mutta ne ovat niin raskasrakenteisia, etteivät ne sovellu kyseiseen käyttötarkoitukseen. Lisäksi on olemassa yhteen suuntaan kallistettavia pöytiä, mutta yksi kallistussuunta ei riitä.

Kamerajalustoissa on olemassa monia ratkaisuja kameran säätöön. Tällaisella jalustalla on mahdollista toteuttaa paneelin kulman säätö. Kuvassa 5 on esimerkki säädettävästä jalustasta. Jalustassa on itsessään asteikko, josta näkee missä kulmassa ylätaso on. Jalusta kestää n. 12 kg painoa, joten se kestää aurinkopaneelin aiheuttaman kuorman. 100 W paneeli painaa n. 10 kg.



KUVA 5. Säädetty jalusta (Benro)

Koska valmista pöytäratkaisua ei markkinoilta löytynyt, täytyy rakentaa vastaavanlaisesta jalustasta ratkaisu paneelille. Paneelin on oltava siirrettävä, joten siinä on oltavat pyörät. Tasosta, jossa pyörät ovat kiinni, täytyy lähteä korkeussuunnassa säädetty tanko, johon kiinnitetään säädetty jalusta. Tällaisella ratkaisulla saadaan täysin säädetty alusta. Alatasossa on hyvä olla kytkentälaatikko, johon paneelin johdot saadaan kiinni, ja josta on helppo jatkaa johdotusta mittareille ja muille laitteistoille. Kuviossa 33 on esitetty malli siirrettävästä alustasta.



KUVIO 33. Malli paneelin säädetystä alustasta (Benro; Manutan 2013)

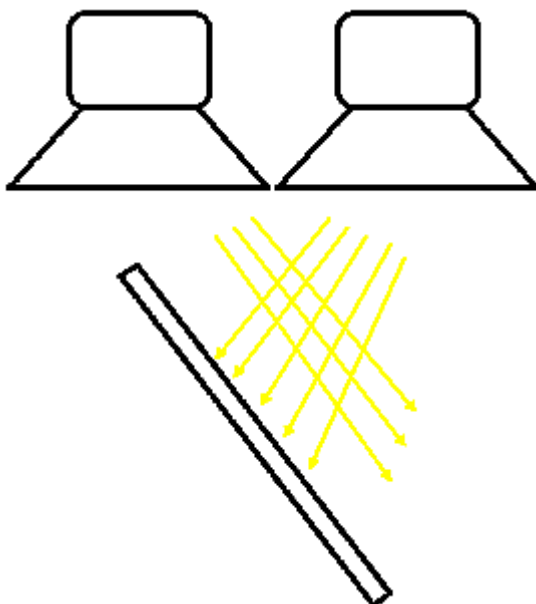
Paneelin mittauksissa ulkona täytyy myös mittalaitteet ja kuorma-vastukset olla liikuteltavissa. Ulkomittauksia varten voidaan mittarit ja vastukset sijoittaa kuvan 6 mukaiselle siirrettävälle apupöydälle.



KUVA 6. Siirrettävä apupöytä (Treston Oy)

4.5.1 Kulman säädön ja valaistuksen välinen ongelma

Koska valaisimen ja paneelin välinen etäisyys on pieni, syntyy kulman säädön kanssa ongelma. Aurinko on maasta niin kaukana, että valo tulee käytännössä yhtenä valonipuna maan pinnalle. Valaisimien kanssa tilanne on eri. Kuvio 34 havainnollistaa tilannetta.



KUVIO 34. Kulman säädön ongelma

Koska valaisimet joudutaan sijoittamaan lähellä paneelia, ei valaisimista tuleva valo ole yhtenäinen nippu, jossa valo kulkee samansuuntaisesti. Tällöin valaisimien avulla mallinnettu paneelien kulman muutos ei tuota oikeita tuloksia.

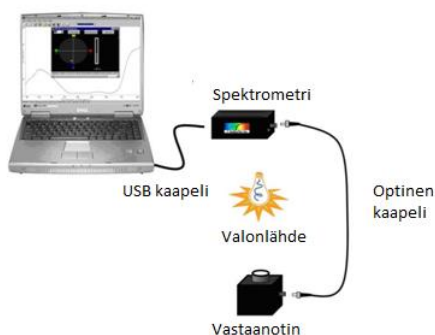
Ongelman voisi ratkaista viemällä valaisimet paneelistä useamman metrin päähän. Tällöin paneeliin saapuva valo on paljon tasaisempi. Mutta silloin täytyisi myös valaisimien määrää lisätä huomattavasti, kuten edellä olevat laskelmat kertovat. Laitteisto olisi silloin niin isokokoinen, ettei siitä saisi kätevästi liikuteltavaa.

4.6 Mittalaitteisto

Rakennettaessa laitteistoa täytyy mitata vastaako valon spektri ja valon teho työssä esiteltyjä tuloksia. Laskennoissa on oletettu valon jakautuvan tasaisesti joka suuntaan, mikä aiheuttaa laskuihin pienen virheen, sillä valo ei leviä valaisimesta absoluuttisen tasaisesti. Laskuilla saadaan kuitenkin suuntaa antavat tulokset, jotka toimivat perustana laitteiston rakennuksessa. Mittauksien avulla voidaan tehdä hienosäätö ja verrata arvoja standardeihin.

4.6.1 Spektrometri

Valon spektriä voidaan mitata spektrometrillä, joka erittelee valon eri aallonpituudet. Kuviossa 35 on StellarNetin mittauslaitteiston periaatekuva. Valo tulee vastaanottiin, josta se kulkee optisen kaapelin kautta spektrometrille. Spektrometri erittelee valon eri aallonpituudet ja tietokoneelle saadaan valon spektri.

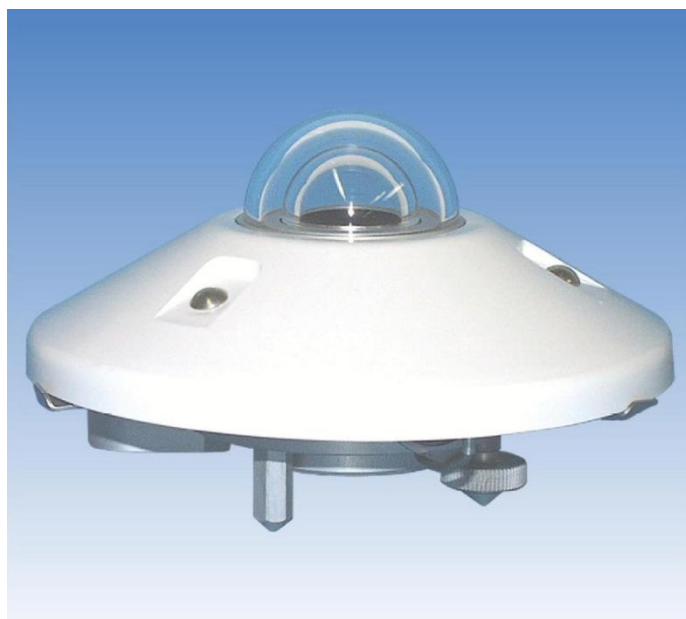


KUVIO 35. Valon spektrin mittauslaitteisto (StellarNet Inc, SpectroRadiometers)

Spektromittareilla on erilaisia mittausalueita. Yhden spektrometrin mittausalue ei riitä auringon valon mittaamiseen. StellarNetillä on olemassa ratkaisu, jossa kaksi mittaria yhdistetään, jolloin mittausalue saadaan laajennettua 200-2300nm. Tällä ratkaisulla voidaan tutkia tarpeeksi laajaa mittausalueutta (StellarNet Inc, Spectrometers).

4.6.2 Pyranometri

Valon säteilytehoa voidaan mitata pyranometrillä. Sen avulla saadaan absoluuttinen säteilyn teho. Pyranometri on kuvan 7 mukainen. Sen lasikuvut taittavat valon mittauspisteeseen vaikka aurinko ei paistaisikaan kohtisuoraan ylhäältä päin. Tällöin spektrometri voidaan asentaa yhteen asentoon ja siitä saadaan mittaustieto riippumatta mistä aurinko paistaa.

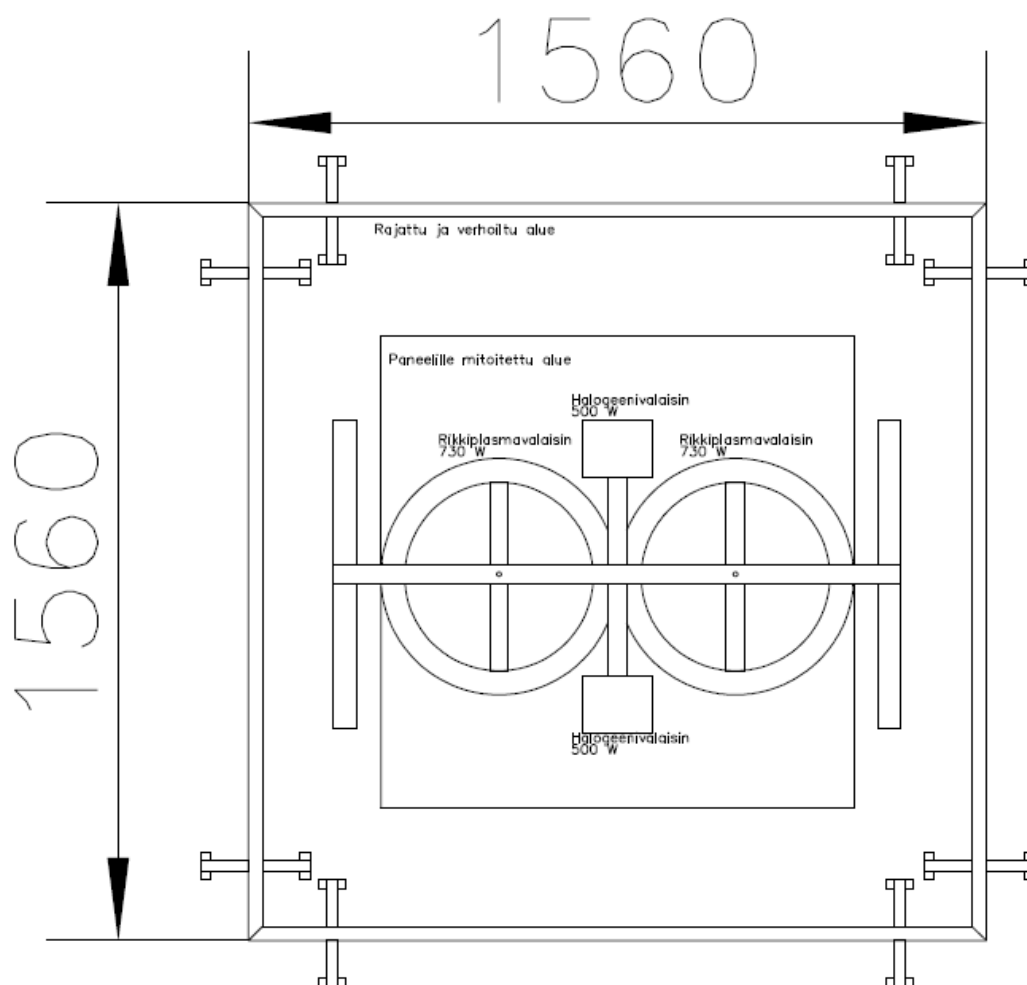


KUVA 7. Pyranometri (The British Atmospheric Data Centre)

Pyranometrejä valmistetaan eri luokituksilla. Kaikki eivät sovellu tieteellisiin mittauksiin. Mittaus alue on n. 300-2800 nm, mutta sekin vaihtelee riippuen mallista. Kipp & Zonen on yksi tunnettu pyranometrien valmistaja (Kipp & Zonen).

4.7 Yhteenveto

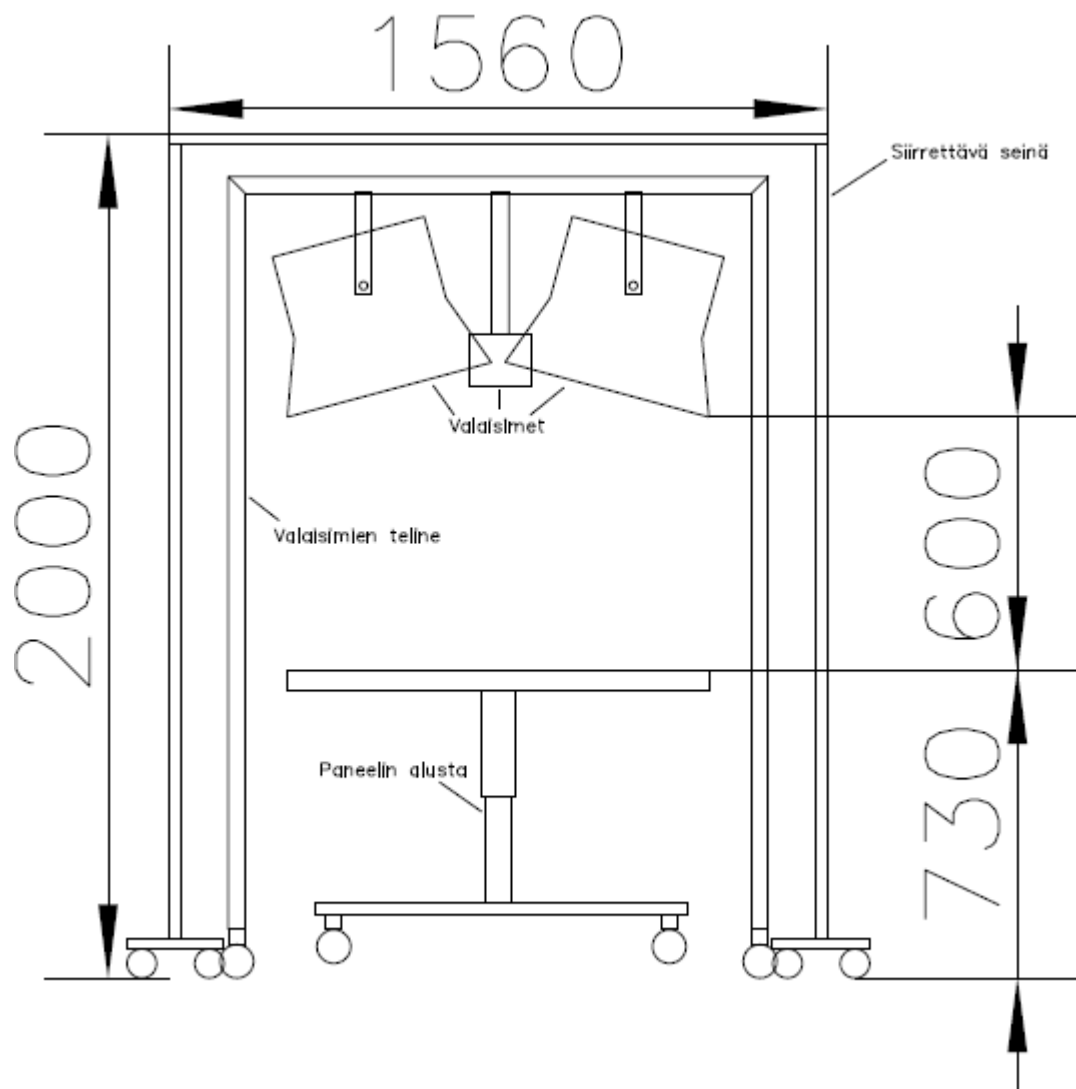
Koululle rakennettava laitteisto olisi suurinpiirtein kuvion 36 mukainen. Valaisimille täytyisi olla pyörillä liikkuva kehikko, johon valaisimet kiinnitetään. On helpompi toteuttaa siirrettävyys siten, että jokainen osa on erillinen kokonaisuus. Mikäli esim. suojaseinät ja valaisimet olisivat kiinteästi yhdessä, niiden siirtely vaikeutuisi huomattavasti, koska tällöin laitteisto ei mahtuisi esim. hissiin. Kokoon taittuvat seinät mahdollistavat isomman työskentelytilan seinien sisäpuolella ja silti ne voidaan kätevästi siirtää toiseen paikkaan.



KUVIO 36. Laitteisto yläpuolelta

Laitteisto vaatii vähintään n. 1,5 m x 1,5 m kokoisen alueen. Liikuteltavat seinät voidaan mitoittaa kuitenkin leveämmäksi, jolloin niiden sisäpuolella on enemmän tilaa.

Kuviossa 37 on esitetty laitteisto sivustapäin.



KUVIO 37. Laitteisto sivusta

Edellä esitettyjen laskujen perusteella paneelia ei voida sijoittaa kuin noin 50-60 cm etäisyydelle paneelistä. Tämä aiheuttaa ongelman auringon sijainnin simuloimiselle. Paneelin kulmaa säätämällä ei saada mallinnettua auringon sijaintia taivaalla, koska valo ei tule yhtenä valonippuna paneelin pinnalle.

Laitteiston korkeus voi olla maksimissaan n. 2 metriä, koska se ei muuten mahdu siirrettäväksi ovista. Koska valaisimet tuottavat n. 1050 W teholla lämpöä, olisi ilmarako tarpeen seinien yläosassa, jotta ilma pääsisi kiertämään pois. Myös valaisimissa ilmoitetut etäisyydet lähellä olevista esineistä olisi toteuduttava, jotta laitteisto olisi turvallinen. Mikäli valaisimet vaativat enemmän tilaa lämpenemisen takia, täytyy valaisimia tuoda alemmaksi, jotta ne eivät olisi niin lähellä ylälevyä. Tällöin myös paneelia on tuotava lähemmäksi lattiaa, mikä voi vaikeuttaa työskentelyä laitteiston parissa. Kuumien halo-

geenivalaisimien ympärillä on oltava kosketussuojaus, jotta opiskelijat eivät voi vahingossa koskea niihin.

Valaistuksen tehoa voidaan säätää puoleen, kun puolet valaisimista sammutetaan. Tällöin valoteho on n. 500 W/m^2 . Himmentämällä valaisimia saadaan tehoa pienennettyä entisestään.

Valaisimien suuren tehon takia, vaaditaan suojalaitteeksi valaisimille 16 A sulake. Liitteessä 1 on lista laitteistoon tarvittavista komponenteista.

5 POHDINTA

Työn lähtökohta oli liikuteltava alusta, jolla voidaan tutkia aurinkopaneelien tuottoa simuloiden ulko-olosuhteita. Valaisimien tehon pienentyessä etäisyyden toisessa potenssissa, ei valaisimia voida kuitenkaan sijoittaa kovinkaan kauaksi paneelistä, kun valaisimien määrä on pieni. Tällöin aurinkopaneelien kulman säätö suhteessa valaisimiin ei tuota realistista tulosta verrattuna pihalla olevaan tilanteeseen, jossa auringon valo tulee yhtenä nippuna kohti paneelia.

Valaisimista saatava valo vastaa kuitenkin likimain auringon valoa, joten aurinkopaneelien tuottoa voidaan valaisimilla kuitenkin tutkia. Paneeli sijoitetaan liikuteltavan alustan päälle, joten aurinkoisella säällä paneelien toimintaa voidaan tutkia pihalla. Sisätiloissa voidaan tällöin tutkia aurinkopaneelien jännite-, virta- ja tehokäyriä. Lisäksi myös lämpötilan vaikutusta paneelin tuottoon voidaan tutkia sisätiloissa jos paneelin lämpötilaa muutetaan. Ulkona voidaan tutkia miten paneelin ja auringon välinen kulma vaikuttaa paneelin sähköntuottoon.

Laitteistolla voidaan mallintaa aurinkoa seuraavan paneelin sähköntuotantoa. Aurinkoa seuraavassa laitteistossa auringon valo tulee kohtisuoraan paneelin pintaan riippumatta kellonajasta. Tällöin voidaan simuloida eri vuodenaikojen vaikutusta tuotantoon sekä päivätasolla vaikuttavia tekijöitä, esim. auringon nousun ja keskipäivän auringon vaikutusta tuotantoon.

Työn tavoitteet eivät täysin toteutuneet, johtuen auringon valon simuloinnin vaikeudesta valaisimien avulla. Mikäli työn tavoitteen mukainen alusta olisi ollut mahdollista, olisi valaisimien määrää täytynyt lisätä huomattavasti ja valaisimien etäisyyttä kasvatettava, jotta valo saapuu paneelin pintaan tasaisesti. Tällöin myös kulman säätö antaisi todellista vastaavat tulokset. Silloin olisi kuitenkin liikuteltavuus ollut lähes mahdotonta purkamatta laitteistoa.

Laitteistolle voidaan tehdä standardin mukainen luokitus, kun halogeeni- ja rikkiplas-mavalaisimien yhteinen spektri saadaan mitattua mittalaitteilla. Luokitus saadaan selville, kun verrataan mitattuja arvoja standardin raja-arvoihin.

LÄHTEET

- Alchemie Limited Inc 2010. Solar Panel Temperature Affects Output. Luettu 3.4.2013
<http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-panel-temperature.html>
- Auramo Trukit Oy, Teollisuuden suojaverhot. Luettu 3.3.2013
<http://www.auramotrukit.fi/suojaverhot.php> luettu 3.3.2013
- Benro 2013, Products. Luettu 3.3.2013
http://www.benrousa.com/products_details_HD3#features luettu 3.3.2013
- EYE Lighting International of North America, Solar Simulation Standards. Luettu 2.4.2012
<http://www.eyesolarlux.com/Solar-simulation-ASTM-IEC-JIS.htm>
- Field, H. 1997. National Renewable Energy Laboratory. Luettu 28.3.2013
<http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/22969.pdf>
- Finnwind 2013, Aurinkoenergiaopas. Luettu 22.3.2013
<http://finnwind.fi/aurinko/Aurinkoenergiaopas-Finnwind.pdf>
- Green Rhino Energy Ltd 2012, Defining standard spectra for solar panels. Luettu 3.2.2013
<http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php>
- Hellegren, M., Heikkinen, L., Suomalainen, L & Kala, L. 1999. Energia ja ympäristö. Helsinki: Hakapaino Oy
- Karttunen, H., Ursa ja Tuorlan observatorio, Aurinkoaika. Luettu 28.3.2013
<http://www.astro.utu.fi/zubi/time/solartim.htm>
- Kipp & Zonen, Pyranometers. Luettu 4.4.2013
<http://www.kippzonen.com/?productgroup/331/Pyranometers.aspx>
- Kodin vihreä energia Oy, Mikroinvertterit. Luettu 4.4.2013
<https://sites.google.com/site/kodinvihreaenergia/mikroinvertterit>
- Letting Chibobo Shine. Investigating the Characteristics of Photovoltaic Panels. Luettu 14.3.2012
<http://www.lettingchiboboshine.org.au/pages/activities/investigating-the-characteristics-of-photovoltaic-solar-panels.php>
- LOT-Oriel Group Europe, Halogen light sources. Luettu 21.2.2013
http://www.lot-oriel.com/files/downloads/lightsources/eu/LQ_Operating_tungsten_halogen_lamps_eu.pdf
- Manutan 2013, Teollisuuspyörä. Luettu 3.3.2013
http://www.witre.fi/teollisuuspyora-joustokumia-150-E2-80-93400-kg_52015M.html
- Markvart, T & Castañer, L. 2006. Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation. Amsterdam: Elsevier

MidSouth Building Supply, MonocrystallineSolarPanel, kuva. Luettu 30.1.2013
<http://www.msbs.net/Portals/0/images/MonocrystallineSolarPanel.jpg>

Motiva, Halogeenilamppu. Luettu 22.3.2013
<http://www.lampputieto.fi/lamput/lampputyypit/halogeenilamppu/>

Naps Systems Oy 2009, Aurinkosähköjärjestelmän asennus- ja käyttöopas. Luettu 22.3.2013
http://www.sahko.fi/UserFiles/humalistonsahko/File/Asennusohjeet/as_ohje.pdf

Nasa, Visible Light. Luettu 22.3.2013
http://missionscience.nasa.gov/ems/09_visiblelight.html

Nasa 1999, Solar Radiation and the Earth System. Luettu 2.4.2013
<http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/July61999siteupdate/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>

NESTA 2012, Solar Radiation at Earth. Luettu 6.2.2013
http://www.windows2universe.org/earth/climate/sun_radiation_at_earth.html

Newport, Oriel Sol1A Class ABB Solar Simulators. Luettu 22.3.2013
<http://www.newport.com/Oriel-Sol1A-Class-ABB-Solar-Simulators/885081/1033/info.aspx>

Newport, Solar simulation. Luettu 22.3.2013
<http://www.newport.com/images/webDocuments-EN/images/12298.pdf>

Opetushallitus, Säteilytasapaino. Luettu 2.3.2013
<http://www02.oph.fi/etalukio/maantiede/kurssi1/sateilytasapaino.html>

Oy Airam Electric Ab, Energiaa säästävät halogeenit. Luettu 22.3.2013
http://www.airam.fi/es-halog_lineaariset.html

Oy Airam Electric Ab, Halogeenilamput. Luettu 22.3.2013
<http://www.airam.fi/113.html>

PlasmaBright 2010, Indoor floodlights. Luettu 14.2.2013
<http://www.plasmabright.com/psh0731b.asp>

PVEducation, Air Mass. Luettu 28.3.2013
<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>

PVEducation, Spectral response. Luettu 4.4.2013
<http://pveducation.org/pvcdrom/characterisation/spectral-response>

PVEducation, Standard Solar Spectra. Luettu 4.4.2013
<http://pveducation.org/pvcdrom/appendicies/standard-solar-spectra>

Sharp, Tekniset tiedot. Luettu 3.4.2013
http://eng.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2012/05/SunFields_SHARP_Datasheet_ND-180-185-190-195R1S_EN.pdf

Sidhu, R. & Carlson, D. 2010. Crystalline Silicon Solar Cell Technology, luettu 3.4.2013 http://www.lesker.com/newweb/news/jpg/BPSolarSidhu_4-13-2010.pdf

Solarpowernotes, How solar cells works. Luettu 30.1.2013
<http://www.solarpowernotes.com/how-solar-cells-works.html>

Song, X. Miller, E & Garmire D. 2010. Experimental study of solar spectrum impact on solar cells. Luettu 7.2.2013
http://materiales.azc.uam.mx/area/Ingenieria_Materiales/investigaci%C3%B3n/2261204/cuan%20calif/Cuan%20TechConWo2010/CD/Cleantech2010/pdf/1168.pdf

Specmat 2009, Solar cell overview. Luettu 6.2.2013
<http://www.specmat.com/Overview%20of%20Solar%20Cells.html> Luettu 6.2.2013

Stellar spectra. Luettu 3.2.2013
http://jersey.uoregon.edu/~imamura/122/lecture-3/stellar_spectra.html

StellarNet Inc, Spectrometers. Luettu 25.2.2013
http://www.stellarnet.us/products_spectrometers.htm

StellarNet Inc, SpectroRadiometers. Luettu 25.2.2013
http://www.stellarnet.us/PopularConfigurations_radiosystems.htm

Suntekno, Aurinkoenergia. Luettu 3.3.2013
<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//aurinkoenergia.pdf>

Suntekno, Aurinkopaneelien tehontuottomittauksia. Luettu 2.4.2013
<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//paneelimittaukset.pdf>

Suomen luonto 2011, Kevätpäivän seisaus tuo valon pohjoiseen. Luettu 2.4.2013
<http://www.suomenluonto.fi/sisalto/artikkelit/kevatpaivantasaus-tuo-valon-pohjoiseen/>

The British Atmospheric Data Centre, Kipp & Zonen CM21 Pyranometer. Luettu 25.2.2013 http://badc.nerc.ac.uk/data/cardington/instr_v7/pyranometer.html

Tiwari, G. 2002. Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications. India: Alpha Science International Ltd.

Treston Oy, Siirrettävät apupöydät. Luettu 3.3.2013
http://www.treston.fi/index.php?article_id=1826&from_id=6175&product_group=4435

University of Oregon, Sun path chart program. Luettu 10.11.2012
<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>

Vattenfall, Sähkön mikrotuotanto. Luettu 2.4.2013
<http://www.vattenfall.fi/fi/sahkoen-mikrotuotanto.htm>

VP-Lux, PSH0731B. Luettu 7.2.2013
<http://www.vplux.fi/rikkiplasmavalaisimet/psh0731b-730w-4500k-6500k-7500k/>

VP-Lux, Rikkiplasmavalaisimet. Luettu 7.2.2013

<http://www.vplux.fi/rikkiplasmavalaisimet/>

VP-Lux, Rikkiplasmavalaisin 730 W. Luettu 7.2.2013

[http://www.vplux.fi/rikkiplasmavalaisimet/psh0731b-730w-4500k-7500k/?num=241049&upotusURI=/rikkiplasmavalaisimet/psh0731b-730w-4500k-6500k-7500k/&x167767=Select/Card](http://www.vplux.fi/rikkiplasmavalaisimet/psh0731b-730w-4500k-6500k-7500k/?num=241049&upotusURI=/rikkiplasmavalaisimet/psh0731b-730w-4500k-6500k-7500k/&x167767=Select/Card)

Weicu, 80 W solar module. Luettu 14.3.2013

http://www.weiku.com/products/5817053/80w_solar_module_solar_panel_pv_panel_crystalline_silicon.html

World Energy Council, Survey of Energy Resources 2007.

http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/solar/720.asp

LIITTEET

Liite 1. Tarvikkeet

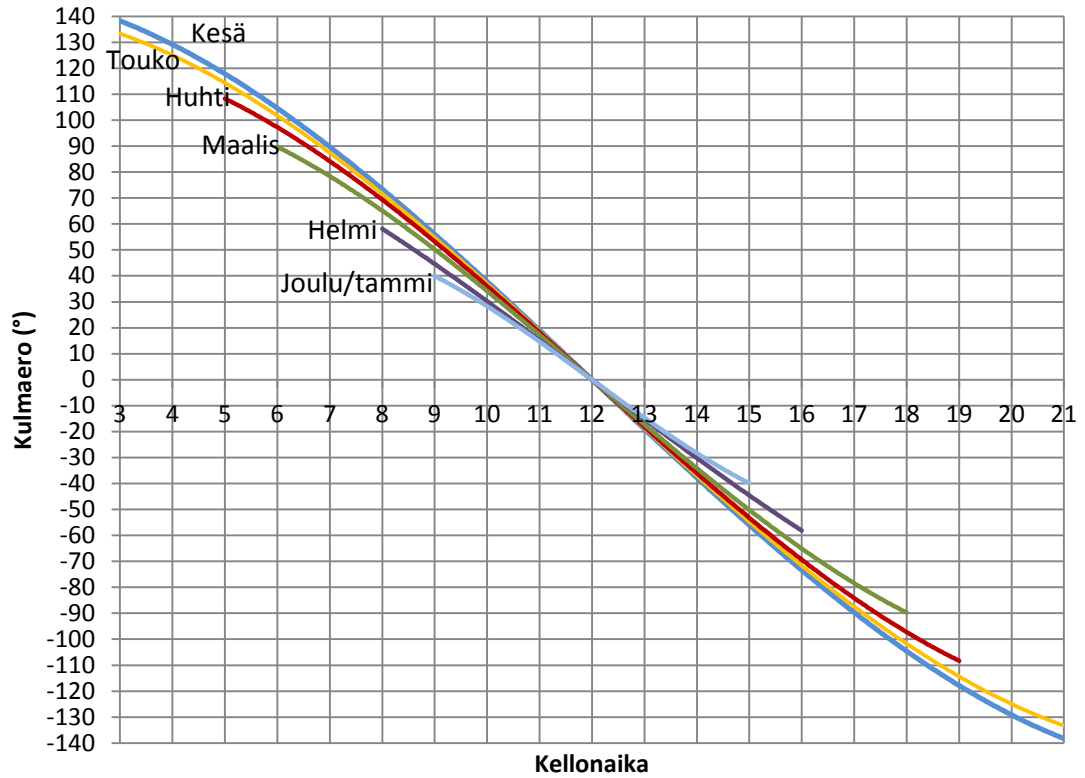
Valaisin	Määrä (kpl)
Halogeenivalaisin 500 W	2
Rikkiplasmavalaisin 730 W	2

Tarvike	Määrä (kpl)
Kamerajalusta	1
KytKentä/liitäntälaatikko	1
Teollisuuspyörä	2
Teollisuuspyörä, lukittava	2
Siirrettävä apupöytä	1

Mittalaitteet	Määrä (kpl)
Kipp & Zonen Pyranometri	1
StellarNet Dual DSR Spectrometri	1

Liite 2. Paneelin ja auringon väliset kulmat Tampereella

Paneelin ja auringon välinen kulmaero Tampereella eri kuukausina



Korkeuskulmaero paneelin ja auringon välillä Tampereella eri kuukausina

